

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний

(повна назва інституту/факультету)

Оптичних та оптико-електронних приладів

(повна назва кафедри)

УДК 621.384

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

В. Г. Колобродов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2019р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 152 Метрологія та інформаційно-

(код і назва спеціальності)

вимірювальна техніка

на тему: Двоканальні оптико-електронні системи спостереження з

дзеркально-лінзовими об'єктивами

Виконав: студент VI курсу, групи ПО-82 мп

(шифр групи)

Ландік Богдан Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н.Микитенко В.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант стартап-проект д.е.н., доцент, Бояринова К.О.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2019 рік

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет (інститут) Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра оптичних та оптико-електронних приладів
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
(освітньо-науковою) програмою

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
« » 20 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Ландіка Богдана Валерійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації двоканальні оптико-електронні системи
спостереження з дзеркально-лінзовими об'єктивами
науковий керівник дисертації Микитенко В.І., к.т.н., доцент ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від «7» листопада 2019 р. №3848-с
2. Строк подання студентом дисертації 17.12.2019
3. Об'єкт дослідження оптико-електронні системи цілодобового
всепогодного спостереження
4. Предмет дослідження Покращення масогабаритних характеристик
двоканальних оптико-електронних систем спостереження
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1) Літературний огляд та па-
тентний пошук за тематикою роботи; 2) Обґрунтування напрямку

РЕФЕРАТ

ДВОКАНАЛЬНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З ДЗЕРКАЛЬНО ЛІНЗОВИМИ ОБ'ЄКТИВАМИ

Ландік Б.В. Двоканальні оптико-електронні системи спостереження з дзеркально-лінзовими об'єктивами.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю – (152) Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена проектуванню двоканальної оптико-електронної системи спостереження з мінімізованим оптичним входним блоком.

Оптико-електронні системи, що працюють в декількох спектральних діапазонах, призначені для цілодобового всепогодного спостереження наразі є важливим шляхом розвитку оптотехніки. Як правило, основним елементом таких пристроїв є оптико-електронна система видимого діапазону, а допоміжним – тепловізійна. Інформація, що отримується в кожному діапазоні, взаємно доповнює інформацію, що надходить в іншому діапазоні, що дозволяє, в кінцевому підсумку, підвищити об'єктивність вихідної інформації. В приладах спостереження це приводить до збільшення інформації, що міститься у вихідному зображенні, і, в кінцевому підсумку, до кращого дешифрування картини, що пред'являється спостерігачеві для аналізу. Двоканальні оптико-електронні системи знайшли широке застосування в багатьох сферах людської діяльності. Проте мають свої недоліки, які потрібно вирішувати, тому дана тема є актуальною.

Магістерська дисертація складається з чотирьох розділів.

Перший розділ присвячений літературному огляду та патентному пошуку двоканальних оптико-електронних систем спостереження (ДКОЕСС). Розглянуто галузі використання таких систем та варіанти суміщення їх каналів. Було

проаналізовано переваги та недоліки типових матричних приймачів випромінювання і приведено порівняльні таблиці сучасних ДКОЕСС.

В другому розділі приведена узагальнена математична модель дистанційних спостережень, розглянуто релевантні характеристики оптичної системи та приймачів випромінювання. Окрім цього приведено варіант енергетичного розрахунку оптико-електронної системи за стандартом NATO 4347.

Третій розділ присвячений проектуванню ДКОЕСС. В першому підрозділі приведено аналіз факторів впливаючих на маса-габаритні розміри ДКОЕСС. Другий і третій підрозділ присвячені моделюванню, габаритному розрахунку та синтезу ДКОЕСС. Крім того, проведено розрахунок максимальної дальності виявлення та розпізнавання інфрачервоного каналу синтезованої системи.

Четвертий розділ присвячено розробці стартап-проекту «Двоканальна оптико-електронна система спостереження з дзеркально-лінзовими об'єктивами» і аналізу перспектив входження розробки на ринок з маркетингової точки зору.

В процесі розробки проекту було написано наступні роботи:

1. Ландік Б.В. Двоканальні оптико-електронні системи спостереження // XII Відкрита всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – с. 97-100

2. Ландік Б.В. Двоканальні оптико-електронні системи спостереження // XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», м. Київ, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – с. 78-80

Ключові слова: *оптико-електронні системи спостереження, дзеркально-лінзові системи, двоканальні оптико-електронні системи.*

ABSTRACT
DUAL CHANNEL OPTICAL-ELECTRONIC SURVEILLANCE
SYSTEMS WITH MIRROR LENSES

Landik BV Dual-channel optoelectronic surveillance systems with mirror lenses.

Dissertation for a master's degree in specialty - (152) Metrology and information-measuring technique. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the design of a two-channel opto-electronic surveillance system with a minimized optical input unit.

Optical-electronic systems operating in several spectral bands, intended for round-the-clock all-weather observation, are now an important way of developing optics. As a rule, the main element of such devices is the opto-electronic system of the visible range, and the auxiliary - thermal imaging. The information received in each band is complementary to the information coming in the other band, which ultimately increases the objectivity of the original information. In surveillance devices, this leads to an increase in the information contained in the original image and, ultimately, to a better decoding of the picture presented to the observer for analysis. Dual-channel optoelectronic systems have been widely used in many fields of human activity. However, there are drawbacks that need to be addressed, so this topic is relevant.

The master's thesis consists of four sections.

The first section is devoted to the literature review and patent search of Dual Channel Optical-Electronic Surveillance Systems (DCOESS). The areas of use of such systems and options for combining their channels are considered. Advantages and disadvantages of typical radiation matrix receivers were analyzed and comparative tables of modern DCOESS were presented.

The second section presents a generalized mathematical model of remote observations, and discusses the relevant characteristics of the optical system and the

radiation receivers. In addition, a version of the energy calculation of the opto-electronic system according to NATO standard 4347 is given.

The third section is devoted to the design of the DCOESS. The first section provides an analysis of the factors affecting the mass-dimensional dimensions of the DCOESS. The second and third sections are devoted to the simulation, size calculation and synthesis of the DCOESS. In addition, the maximum range of detection and recognition of the synthesized system was calculated.

The fourth section is devoted to the development of the startup project " Dual-channel optoelectronic surveillance systems with mirror lenses" and to analyze the prospects for market entry from a marketing point of view.

During the project development the following works were written:

1. Ландік Б.В. Двоканальні оптико-електронні системи спостереження // XII Відкрита всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – с. 97-100

2. Ландік Б.В. Двоканальні оптико-електронні системи спостереження // XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», м. Київ, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – с. 78-80

Keywords: *opto-electronic surveillance systems, mirror-lens systems, dual-channel opto-electronic systems.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПАТЕНТНИЙ ПОШУК.....	13
1.1 Галузі використання багатоканальних оптичних систем.....	13
1.2 Загальні вимоги до двоканальних оптико-електронних систем спостереження	18
1.3 Методи розрахунку оптичних систем	19
1.4 Огляд патентів двоканальних оптико-електронних систем спостереження з дзеркально-лінзовими об'єктивами	21
1.5 Варіанти конструкції об'єктівів	24
1.6 Сучасні багатоканальні оптико-електронні системи	28
Висновки до розділу 1	30
РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ.....	32
2.1 Узагальнена математична модель дистанційних спостережень.....	32
2.2 Узагальнені характеристики ОЕСС	34
2.3 Характеристики оптичної системи.....	35
2.4 Характеристики приймачів випромінювання.....	38
2.5 Максимальна дальність виявлення ТПСС	41
2.6 Максимальна дальність розпізнавання ТПСС	44
Висновки до розділу 2	46
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДВОКАНАЛЬНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ	47
3.1 Методи мінімізації оптичного вхідного блоку	47
3.2 Варіанти сполучення каналів ДКОЕСС	50

3.3 Габаритний розрахунок приладу	51
3.4 Енергетичний аналіз	59
3.4.1 Розрахунок максимальної дальності виявлення	59
3.4.2 Розрахунок максимальної дальності розпізнавання	61
3.5 Розробка рекомендацій щодо схемо-технічних рішень двоканальних оптико-електронних систем спостереження	63
Висновки до розділу 3	64
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ДВОКАНАЛЬНА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА З ДЗЕРКАЛЬНО-ЛІНЗОВИМИ КАНАЛАМИ»	65
4.1 Опис ідеї проекту	65
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	67
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартаппроекту	68
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	74
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	76
Висновки до розділу 4	79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	83
ДОДАТОК А	86
ДОДАТОК Б	87
ДОДАТОК В	88
ДОДАТОК Г	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CCD(ПЗЗ)	Прилад із зарядовим зв'язком
CMOS(КМОН)	Комплементарний метал-оксид-напівпровідник
MDR(МДВ)	Максимальна дальність виявлення
MRR(МДР)	Максимальна дальність розпізнавання
MRTD(MPPT)	Мінімально роздільна різниця температур
БКОЕС	Багатоканальна оптико-електронна система
ДКОЕС	Двоканальна оптико-електронна система
ДЛОС	Дзеркально-лінзові оптичні системи
ІЧ	Інфрачервоний
МБМ	Мікроболометрична матриця
МДВ	Максимальна дальність виявлення
МДР	Максимальна дальність розпізнавання
МПВ	Матричний приймач випромінювання
МПФ	Модуляційна передавальна функція
ОЕС	Оптико-електронна система
ОЕСС	Оптико-електронна система спостереження
ОПФ	Оптична передавальна функція
ОС	Оптична система
ПВ	Приймач випромінювання
ПТРК	Протитанковий ракетний комплекс
ТВСС	Телевізійна система спостереження
ТПСС	Тепловізійна система спостереження
ФРТ	Функція розсіювання точки
ФЦО	Фоново-цільова обстановка

ВСТУП

Актуальність. Нині широкого поширення набувають оптико-електронні системи, що працюють в декількох спектральних діапазонах, призначені для цілодобового всепогодного спостереження. Як правило, основним елементом таких пристроїв є оптико-електронна система видимого діапазону, а допоміжним – тепловізійна. Інформація, що отримується в кожному діапазоні, взаємно доповнює інформацію, що надходить в іншому діапазоні, що дозволяє, в кінцевому підсумку, підвищити об'єктивність вихідної інформації [13]. В приладах спостереження це приводить до збільшення інформації, що міститься у вихідному зображенні, і, в кінцевому підсумку, до кращого дешифрування картини, що пред'являється спостерігачеві для аналізу.

Двоканальні оптико-електронні системи спостереження використовуються для вирішення декількох класів задач:

- виявлення
- розпізнавання
- ідентифікація

Оптико-електронні системи, які об'єднали переваги декількох спектральних діапазонів, дозволяють бачити в повній темряві, при яскравому освітленні, виділяти теплоконтрастні об'єкти, спостерігати крізь віконне скло вдень і вночі, перемикаючись на необхідну частину спектру.

Сучасні ДКОЕСС знайшли широке застосування в багатьох сферах людської діяльності. Проте мають свої недоліки, які потрібно вирішувати, тому дана тема є актуальною.

Мета роботи. Метою роботи є проектування двоканальної оптико-електронної системи спостереження з мінімізованим вхідним оптичним блоком.

Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести літературний та патентний пошук за тематикою роботи;

2. Побудувати математичну модель оптико-електронних систем спостереження;
3. Дослідити математичну модель для мінімізації оптичного вхідного блоку двоканальної оптико-електронної системи спостереження;
4. Виконати габаритний розрахунок та синтезувати двоканальну оптико-електронної системи спостереження;
5. Розробити стартап-проект двоканальної оптико-електронної системи спостереження.

Об'єкт дослідження. Оптико-електронні системи цілодобового всепогодного спостереження.

Предмет дослідження. Покращення масогабаритних характеристик ДКОЕСС.

Публікації. За матеріалами магістерської дисертації у збірниках тез було опубліковано 2 тези конференцій.

1. Ландік Б.В. Двоканальні оптико-електронні системи спостереження // XII Відкрита всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – с. 97-100.

2. Ландік Б.В. Двоканальні оптико-електронні системи спостереження // XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», м. Київ, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – с. 78-80.

Об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури. Повний об'єм дисертації 91 сторінка, з об'ємом основного тексту 68 сторінок, додатки 6 сторінок. Дисертація містить 36 рисунків, 31 таблицю, список використаної літератури з 25 найменувань на 3 сторінках.

Ключові слова: *оптико-електронні системи спостереження, дзеркально-лінзові системи, двоканальні оптико-електронні системи.*

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПАТЕНТНИЙ ПОШУК

Метою даного розділу є визначення напрямків вдосконалення проектування оптико-електронних систем спостереження, що потребує вивчення сучасного стану проблеми та виявлення основних труднощів, що стоять перед дослідниками.

Основними задачами даного розділу є:

1. Огляд сучасних ОЕСС, класифікація та порівняльний аналіз їх характеристик.
2. Огляд загальних вимог до конструкції БКОЕСС.
3. Вибір типу призначення БКОЕСС для подальшого вдосконалення та визначення шляхів покращення її властивостей.

1.1 Галузі використання багатоканальних оптичних систем

Нині широкого розповсюдження набули оптико-електронні системи призначені для спостереження як вдень, так і вночі. А в ряді випадків ще й при зниженій прозорості атмосфери. У зв'язку з цим вважається за доцільне створення багатоканальних ОЕСС здатних працювати відразу в декількох спектральних діапазонах. Такі системи спостереження складаються з окремих каналів на базі відомих типів ОЕСС і інших приладів таким чином, щоб недоліки одних каналів компенсувалися б перевагами інших. Чималу роль у розвитку багатоканальних оптико-електронних систем зіграло вдосконалення методів обробки оптичних сигналів і зображень, дозволивших отримувати більшу кількість корисної інформації про об'єкт [13]. В кінцевому підсумку це приводить до кращого дешифрування картини, що пред'являється спостерігачеві для аналізу.

До основних сфер використання БКОЕС відносяться:

- військова справа

- контроль (промисловий, екологічний, аерокосмічний і т.д.)
- охорона та безпека
- медицина
- наукові дослідження

Швидкому розвитку і широкому поширенню БКОЕС сприяла їх затребуваність у військовій справі. Військова техніка, яка експлуатується в жорстких умовах і виконує широкий ряд життєво важливих завдань, вимагає застосування всіх можливих технологій. Вкрай важливою вимогою до військових приладів і комплексів, є забезпечення цілодобової роботи в будь-яких умовах навколишнього середовища. До них відносяться різні погодні умови (дощ, сніг, туман), умови зниженою прозорості атмосфери (дим, пил), а також спостереження через різні маскувальні середовища (листя, невеликі шари землі, маскувальні сіті і т.д.). Дані завдання вирішуються застосуванням оптичних систем, що працюють в інфрачервоному діапазоні спектра. Більшість сучасних військових приладів спостереження, стеження, виявлення і розпізнавання цілей оснащуються, як мінімум, двома каналами – видимого та ІЧ-діапазонів (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Зображення видимого спектру (ліворуч) та інфрачервоного (праворуч) в ДКОЕС військового призначення [3]

БКОЕС також знайшли застосування в медицині. Вимірюючи відносно слабкі випромінювання біологічних об'єктів у широкому діапазоні різних фізичних полів, можна робити висновки про температуру, діелектричну проникність не тільки на поверхні, але й усередині живого організму. Інформація з різних каналів взаємно доповнюється й дозволяє різнобічно охарактеризувати біологічний об'єкт у рамках відносно нескладних розрахункових моделей, що обумовлено невеликим алфавітом потенційних об'єктів [13].

Широке розповсюдження БКОЕС отримали в системах екологічного моніторингу. Наприклад, багатоспектральна система працююча в видимому та ІЧ-діапазонах спектра, використовується для моніторингу повітряних мас в атмосфері Землі (Рис. 1.2).

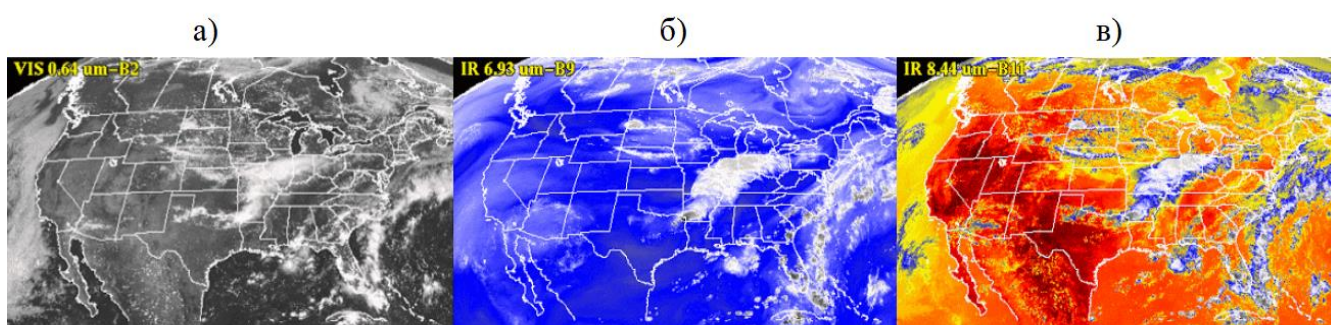


Рисунок 1.2 – Зображення скопичення повітряних мас в атмосфері Землі в *a* – видимому спектрі; *б, в* – ІЧ-спектрі [20]

Крім того, БКОЕС широко застосовуються в промисловому контролі, наприклад, при обстеженні конструкцій будівель, або перевірці стану електричної мережі. Аналіз якості теплоізоляції елементів конструкції пропонується проводити шляхом поєднання зображень тепловізійного і телевізійного каналів. Таке поєднання дозволяє проводити пошук температурних аномалій і градієнтів при наочності і простоті співвіднесення зображення з реальним об'єктом [1].

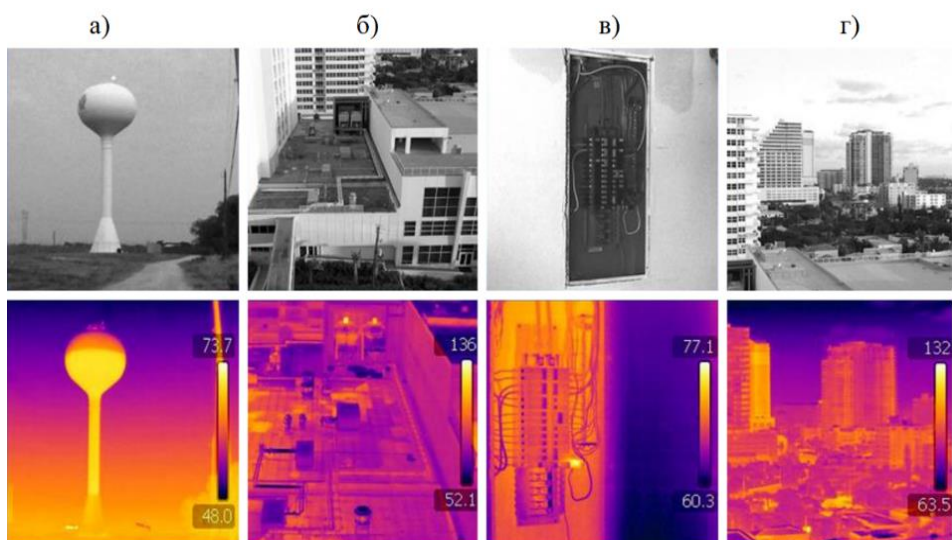


Рисунок 1.3 – Зображення дистанційної діагностики видимого спектру (зверху) та інфрачервоного (знизу) в ДКОЕС *а,б,г* – стану будівель; *в* – стану електромережі [20]

Цікавим прикладом використання БКОЕС в приладах контролю є система виявлення вм'ятин на яблуках. Використання декількох діапазонів, або окремих довжин хвиль, що лежать в ближньому ІЧ-випромінюванні, дозволяє помітно спростити виявлення вм'ятин в порівнянні з видимим діапазоном спектру. Складанням зображень декількох спектральних каналів (рис 1.4) дозволяє виявляти вм'ятини з імовірністю більше 90% [20].

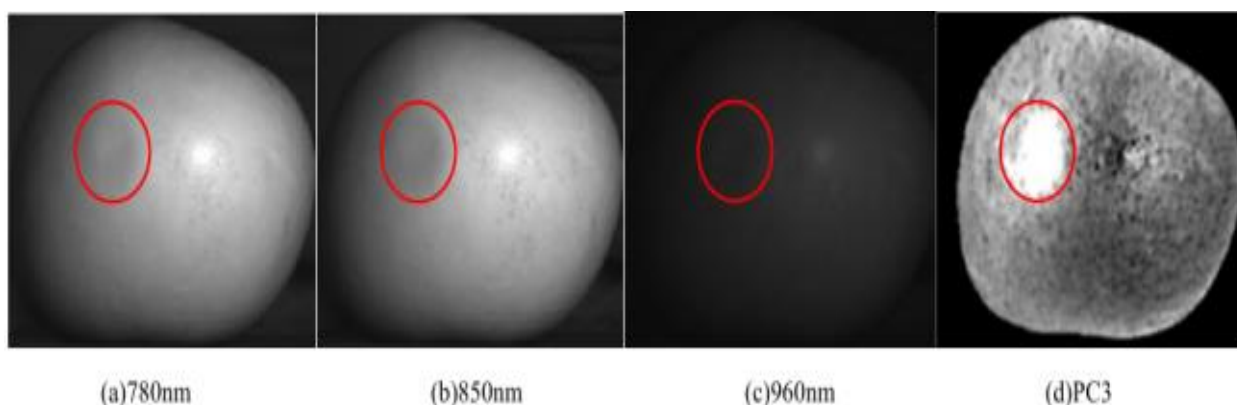


Рисунок 1.4 – Зображення вм'ятини на яблуці в трьох довжинах хвиль і їх комплексне зображення [20]

Крім того широкого використання БКОЕС знайшли в системах безпеки і охоронних комплексах. На рис. 1.5 зображений знімок камери відеоспостереження в двох спектрах.



Рисунок 1.5 – Зображення з камери відеоспостереження в видимому спектрі (ліворуч) і ІЧ-спектрі (праворуч) [3]

Дана система призначена для виявлення і розпізнавання об'єктів і спостереження за заданою територією в широкому спектральному діапазоні видимого та ІЧ-випромінювань. Використання двох оптичних каналів дозволяє вести цілодобове спостереження території, в тому числі, в умовах поганої видимості, негоди і т.д.

В якості окремих каналів БКОЕСС можуть бути використані пасивні телевізійні системи видимого діапазону спектру, телевізійні системи видимого діапазону спектру з постійним підсвічуванням, телевізійні системи видимого діапазону спектру з імпульсним підсвічуванням, пасивні телевізійні системи ультрафіолетового діапазону спектру, низькорівневі телевізійні системи, пасивні тепловізійні системи, активні тепловізійні системи з постійним підсвічуванням, активні тепловізійні системи з імпульсним підсвічуванням, лазерні скануючі далекомірні системи, відеоспектрометри, відеополяриметри, гамма-квантові діагностичні системи, рентгенівські діагностичні системи [16].

1.2 Загальні вимоги до двоканальних оптико-електронних систем спостереження

Загальні вимоги до ДКОЕС зводяться до наступного:

- забезпечення підвищеної дальності виявлення і розпізнавання об'єктів. Однак ця вимога невіддільна від іншої - забезпечення кута поля зору, прийнятого для ефективного пошуку і виявлення об'єктів. Оскільки ці вимоги суперечать одна одній, ДКОЕС повинен складатися з каналу пошуку і виявлення з широким кутом поля зору і з порівняльно вузькосмугового каналу розпізнавання. На проміжних дальностях дії не виключені і змішані функції каналів;
- всепогодність і цілодобовість роботи. Вимога всепогодності зводиться до забезпечення необхідної ймовірності орієнтування, виявлення і розпізнавання об'єктів в усій сукупності зовнішніх умов. Ця ймовірність характеризується ймовірнісними характеристиками окремих каналів ДКОЕС. Вимога цілодобовості зводиться до наявності каналів які допускають роботу ДКОЕС як вдень так і вночі;
- можливість роботи в умовах впливу світлових і пиледимових перешкод;
- адаптивність тобто здатність ДКОЕС змінювати режими роботи каналів, фокусування оптичних систем, регулювання яскравості, посилення, кольоровості та контрасті;
- наявність автоматизованої системи контролю режимів роботи і вивірки взаємного положення оптичних осей, масштабів зображення і кутів полів зору окремих каналів, а також компенсація якості зображення в разі виникнення перешкод різного роду;
- модульний принцип побудови. Монтаж взаємозамінних модулів повинен бути реалізований за допомогою оптичних, механічних, оптико електронних і електричних адаптерів, що дозволяє гнучку перебудову системи стосовно її нового функціонального призначення. [24]

Незважаючи на різноманітність вирішуваних завдань і можливих схемних варіантів виконання, основні концепції проектування ДКОЕС можна звести до наступного:

- канали повинні бути підібрані відповідно до їхнього фізичного принципу побудови таким чином, щоб недоліки одного каналу компенсувалися перевагами іншого;
- схема побудови ДКОЕС повинна допускати автономну роботу окремих каналів;
- процес формування зображення повинен здійснюватися в реальному часі;
- окремі канали не повинні створювати один одному оптичних, електричних, електромагнітних або механічних перешкод, а також взаємних конструктивних незручностей;
- в інтересах забезпечення високої якості зображення вхідні оптика різнорідних по області спектра каналів повинна бути по можливості роздільною і мати, якщо це можливо, мінімальні габарити. Якщо це неможливо, то багатоспектральна оптична система, загальна для цих каналів, не повинна знижувати якість зображення до рівня, при якому не виконуються технічні вимоги до ДКОЕС;
- необхідно ретельне узгодження оптичних осей, кутів полів зору і збільшень окремих каналів. [24]

1.3 Методи розрахунку оптичних систем

Розрахунок оптичних систем, що припускає визначення їх конструктивних параметрів (радіусів кривизни поверхонь, осьових відстаней, матеріалів елементів і т.д.) для заданих характеристик, є нетривіальним завданням, рішення якої реалізується різними методами.

Найпростішим є метод проб, для використання якого необхідна вихідна оптична система (взята з патентів, архівів, літературних джерел), що володіє

близькими до необхідних характеристик. Масштабуванням, послідовної оптимізацією, збільшенням або зменшенням кількості компонентів, поділом склеювань\склеюванням окремих лінз домагаються необхідних характеристик якості зображення. Розрахунок методом проб зазвичай вимагає інтуїції і досвіду розраховувача, займає багато часу і не завжди призводить до необхідного результату. Основним фактором успіху є правильний вибір вихідної системи. даний метод не дозволяє розраховувати нові оптичні системи, що не мають аналогів [15].

Найбільш широке поширення при проектуванні зображують оптичних систем отримав алгебраїчний метод розрахунку, заснований на застосуванні теорії аберацій третього порядку. При використанні алгебраїчного методу проводиться синтез оптичної системи з тонких компонентів шляхом вирішення алгебраїчних рівнянь залежностей коефіцієнтів аберацій третього порядку від параметрів системи. При великих значеннях відносного отвору і кутового поля точність розрахунку зменшується, внаслідок збільшення впливу аберацій вищих порядків [15, 18].

Однак в ІЧ-діапазоні великі значення довжин хвиль дозволяють застосовувати даний метод для розрахунку світлосильних і ширококутних систем.

Метод композиції оптичних систем передбачає синтез системи з поверхонь і елементів з відомими властивостями (величинами аберацій третього порядку). За своєю роллю в оптичній системі елементи поділяються на силові, корекційно-силові і корекційні. Даний метод спочатку використовувався для розрахунку ширококутних симетричних об'єктивів, які працюють у видимому діапазоні спектра. Корекція хроматичної аберації передбачається за рахунок заміни одиночних лінз на склейки з різних марок оптичного скла з ахроматическим радіусом. Використання даного методу для розрахунку систем, працюючих в ІЧ-області спектра, ускладнене відсутністю оптичних клеїв, прозорих в даному діапазоні [15].

Необхідно відзначити, що і алгебраїчний метод і метод композиції наразі є комбінованими. Перший етап розрахунку полягає в отриманні стартової системи,

вільної від аберацій третього порядку. На другому етапі проводиться оптимізація і автоматизована корекція аберацій системи.

При розрахунку складних оптичних систем, що складаються з декількох рознесених груп компонентів, найбільш доцільно скористатися методом розрахунку по частинах, що застосовуються, наприклад, при розрахунку багатоканальних систем, мікроскопів та зорових труб. При цьому оптична система поділяється на окремі частини, кожна з яких розраховується окремо (із застосуванням описаних вище методів розрахунку). При такому підході можуть бути істотно спрощені процеси складання і юстування системи, оскільки окремі компоненти системи можуть бути від'юстовані і проконтрольовані незалежно один від одного [15].

Модульний принцип проектування, є розвитком композиційного методу і передбачає синтез оптичної системи з оптичних модулів з відомими корекційними властивостями. В якості модуля використовуються лінзи з асферичними поверхнями, апланатичні меніски і гіперхроматичні лінзи [15].

Важливою особливістю розрахунку ОЕСС є необхідність моделювання та оптимізації окремих оптичних блоків одночасно в декількох каналах і спектральних діапазонах. Для цього необхідно використовувати програмні пакети оптичного проектування, які містять режими мультиконфігурації (Zemax, CodeV і т.д.).

1.4 Огляд патентів двоканальних оптико-електронних систем спостереження з дзеркально-лінзовими об'єктивами

Двоканальна оптико-електронна система (рис. 1.6) з патенту RU2660069C1 містить перший канал, утворений дзеркально-лінзовий об'єктивом, що включає послідовно встановлені головне дзеркало, вторинне дзеркало, лінзовий компенсатор аберацій і фотоприймач випромінювання спектрального діапазону $\Delta\lambda_1 = 8\text{-}12,5$ мкм, і другий канал, встановлений перед першим, оптична вісь якого співвісна оптичній осі першого каналу, утворений згаданим головним дзеркалом, лінзовим компенсатором

аберацій, встановленим в зоні центрального екранування першого каналу, і фотоприймачем випромінювання спектрального діапазона $\Delta\lambda_2 = 0,4-0,7$ мкм [23].

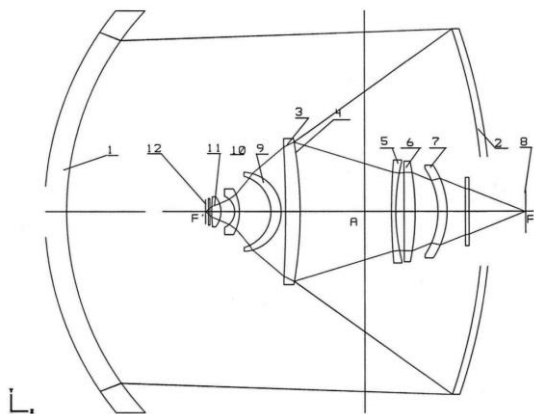


Рисунок 1.6 – Двоканальна дзеркально-лінзова оптико-електронна система [23]

На рисунку 1.6 зображена оптична система двоканального дзеркально-лінзового об'єктива з патенту RU2672703C1, працюючого в видимому та ІЧ-діапазонах.

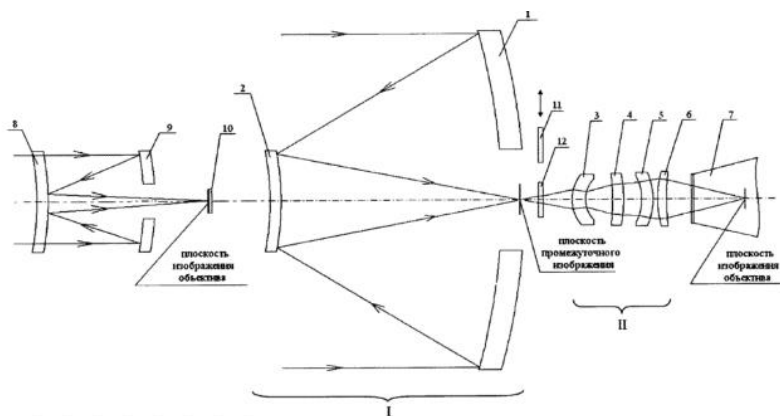
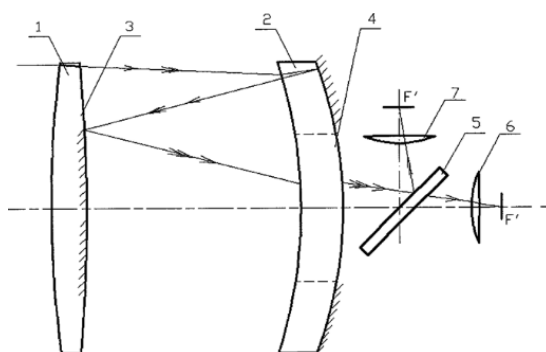


Рисунок 1.7 – Двоканальна дзеркально-лінзова оптико-електронна система [9]

Двоканальна дзеркально-лінзова система складається з тепловізійного каналу, що містить перший компонент, виконаний у вигляді головного увігнутого дзеркала з центральним отвором і вторинного дзеркала, другий компонент, що містить дві позитивні опукло-увігнуті лінзи і приймач випромінювання, і телевізійного каналу, розташованого в зоні центрального екранування тепловізійного каналу, що має з ним

спільну оптичну вісь і містить позитивну лінзу, головне увігнуте дзеркало з центральним отвором і приймач випромінювання, відрізняється тим, що в тепловізійному каналі в першому компоненті головне дзеркало і вторинне дзеркало виконані асферичними, у другому компоненті в простір між двома позитивними опукло-увігнутими лінзами додатково введені позитивна і негативна вігнуто-опуклі лінзи, причому між першим і другим компонентами формується проміжне зображення, в телевізійному каналі головне дзеркало виконано асферичним, а позитивна лінза виконана увігнуто-опуклою з відбиваючим покриттям в центральній зоні опуклої поверхні [9].

Ще один приклад двоканальної системи з патенту RU98071U1 зображений на рисунку 1.8. Вона має набагато менші маса-габаритні характеристики, ніж системи згадані вище, адже встановлюється на нанодрони.



Риунок 1.8 – Двоканальна дзеркально-лінзова оптико-електронна система [7]

Двоканальна дзеркально-лінзова система складається з одиночної позитивної лінзи, негативного меніска, звернений увігнутістю до предмету, з відбиваючим покриттям на периферійній частині опуклою поверхні, дзеркала з зовнішнім відбиванням, нанесене на центральній частині другій поверхні позитивної лінзи. Всі лінзи виконані з одного матеріалу, відповідно до винаходу, в систему введені два компенсатора аберацій для кожного діапазону спектра, виконані з негативною лінзи, що є центральною частиною негативного меніска, і позитивних лінз компенсаторів, розташованих перед площинами зображення в кожному з спектральних діапазонів, а

між негативною лінзою і позитивними лінзами компенсаторів встановлено спектроділильне скло, яке ділить зображення на телевізійне і на тепловізійне [7].

1.5 Варіанти конструкції об'єктивів

БКОЕС виділено чотири типи побудови:

- системи з автономними (незалежними) каналами, кожен з яких оснащений власним матричним приймачем;
- системи з єдиним об'єктивом і змінними спектральними фільтрами, або змінними приймачами випромінювання;
- системи, що використовують дво- або багатодіапазонні приймачі випромінювання;
- системи з єдиним входним компонентом і спектродільниками.

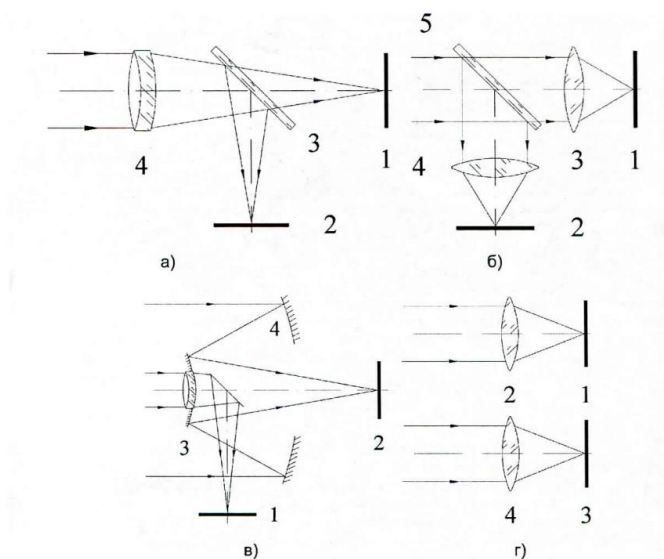


Рисунок 1.9 – Типові схеми входних блоків ДКОЕС [11] *а)* 1,2 – площини каналів приймачів випромінювання (ПВ); 3 – дихроїчне дзеркало; 4 – широкоспектральний об'єктив; *б)* 1,2 – площини каналів ПВ; 3,4 – вузькоспектральні об'єктиви каналів; 5 – дихроїчне дзеркало; *в)* 1,2 – площини каналів ПВ; 3,4 – з'єднаний двоспектральний об'єктив; *г)* 1,3 – площини каналів ПВ; 2,4 – вузькоспектральні об'єктиви каналів.

Відмінності між варіантами конструкції ДКОЕС визначаються конкретними вимогами їх призначення. Вимоги в кінцевому підсумку визначають, склад приймачів випромінювання, кути їх полів зору, вимоги по чутливості [10].

Оптичні схеми об'єктивів ОЕСС можна умовно розділити на три великі групи відносно характеру елементів, що входять в їх конструкцію: лінзові, дзеркальні та дзеркально-лінзові [10].

Лінзові об'єктиви поділяють на кілька типів, наприклад, двухлінзові, триплети, світлосильні об'єктиви, ширококутові, телеоб'єктиви тощо. У зв'язку з високими вимогами до якості зображення з одного боку, та значними втратами випромінювання в ІЧ-матеріалах з іншого боку, лінзові об'єктиви, що використовуються в ІЧ ОЕСС, намагаються зробити з мінімальною кількістю лінз. Для абераційної корекції використовують асферичні поверхні лінз [10].

Перевагою лінзових систем є значні можливості абераційної корекції, великі поля зору, технологічна простота конструкції, можливість сполучення функції захисного скла й першого компонента, мале він'єтування по полю зору [10].

Лінзовим об'єктивам властиві такі недоліки, як велике селективне поглинання в ряді ділянок оптичного спектра, порівняно великіхроматичні аберації, великі поздовжні габарити [10].

Ці недоліки відсутні в дзеркальних системах, основними перевагами яких є можливість роботи в широкому спектральному діапазоні з малими втратами потоку, відсутність хроматизму, невеликі поздовжні габарити, що приводить до зменшення маси ОЕСС [10].

Основними недоліками дзеркальних систем є екранування частини випромінювання, що знижує функцію передачі модуляції, труднощі боротьби із прямими засвічуваннями, незначні поля зору й велике він'єтування по полю зору. У дзеркальних об'єктивах поліпшення абераційних якостей обмежується малою кількістю корекційних параметрів і часто досягається використанням дзеркальних

асферичних поверхонь. Крім того, сучасні дзеркальні системи для запобігання вин'єтування променів будують за поза осьовими схемами [10].

Деякі із вказаних вище недоліків відсутні в дзеркально-лінзових системах, у яких можна досягти більших відносних отворів і значних кутів поля зору. Дзеркально-лінзові схеми мають більшу у порівнянні із дзеркальними системами кількість корекційних параметрів, серед яких найбільше значення мають показники заломлення матеріалу лінз. Застосування менісків і дзеркал Манжена (дзеркала із внутрішнім відбиттям) дозволяє створювати об'єктиви без використання асферичних поверхонь, виготовлення й контроль яких викликає значні труднощі [10].

Розглянемо деякі типові схемотехнічні рішення об'єктивів, що використовуються в ОЕСС.

Вагомим недоліком лінзових об'єктивів вважають складності, що виникають при виготовленні високоякісних об'єктивів великих діаметрів через різке збільшення маси і габаритів оптичної системи.

Дзеркальні об'єктиви ОЕСС володіють рядом істотних переваг у порівнянні з лінзовими. В першу чергу, слід відзначити наступні:

- можливість роботи в широкій області спектра (від ультрафіолетової до далекої інфрачервоної);
- відсутність хроматичних аберацій;
- потенційна можливість збільшення вхідної апертури;
- скорочення габаритів, що обумовлено вибором схемного рішення, а також раціональним застосуванням плоских «заломлюючих» дзеркал;
- спрощення процесу виготовлення об'єктива, так як зменшується кількість поверхонь, що потребують в поліровці і нанесенні додаткових покриттів.

В якості недоліків дзеркальних об'єктивів можна відзначити складність юстування оптичної системи об'єктива і чутливість до вібрацій і коливань (наприклад, до поривів вітру).

Дзеркально-лінзові об'єктиви ОЕСС володіють рядом істотних переваг у порівнянні з дзеркальними. В першу чергу, слід відзначити наступні:

- у дзеркальних телескопах скільки-небудь великої апертури і/або відносного отвору використовуються асферичні дзеркала. Тобто елементи об'єктива одночасно виконують і силову функцію (будують зображення) і корекційну (виправляють аберації). У той час як в дзеркально-лінзових зазвичай корекційну функцію несуть лінзові елементи (такі як пластина Шмідта, ахроматичний меніск Максutowa, дволінзовий афокальний коректор), а сферичні дзеркала – тільки силову;
- відбивні поверхні – сферичні (як правило), тобто найбільш легкі і менш схильні до помилок при виробництві. Помилки заломлюючих поверхонь можуть бути в середньому втричі-четверо більшими, ніж у дзеркал. А за рахунок додаткових лінзових елементів можлива краща абераційна корекція, можливість розвивати великі вільні від аберацій поля зору;
- при досягненні деякого рівня різниці температур зовнішнього і внутрішнього обсягів зображення стає більш стабільно. До того-ж дзеркала виявляються захищені від впливу зовнішнього середовища;
- як правило, дзеркально-лінзовий інструменти мають більші чи менші замкнуті лінзами внутрішні обсяги. У той час як дзеркальні – повністю відкриті.

В якості недоліків дзеркально-лінзових об'єктивів можна відзначити наступне:

- охолодження дзеркально-лінзових ОС відбувається повільніше;
- додаткові елементи дзеркально-лінзових об'єктивів ускладнюють схему, підвищують вимоги до жорсткості конструкції труби, пред'являють більш високі вимоги до скла працюючому на заломлення, хроматичні аберації, фільтрація ультрафіолетового випромінювання і далекого інфрачервоного діапазонів на склі.




1.6 Сучасні багатоканальні оптико-електронні системи

Багатоканальні оптико-електронні системи спостереження дуже поширені у наш час, тому їх різновид дуже насичений. В таблицях 1.1, 1.2 розглянуті характеристики декількох класів БКОЕСС, в тому числі:

- багатоканальні оптико-електронні системи;
- двоканальні оптико-електронні системи в ПТРК.

Таблиця 1.1

Двоканальні оптико-електронні системи спостереження

Характер. \ Модель	«ОРЛАН»	«SPECTRO XR»	«САПСАН»
Зображення			
Телевізійний об'єктив			
Спектральний діапазон (мкм)	0,4-0,9	0,4-0,9	0,4-0,9
Кутове поле зору	4°	0,36° ,0,72°, 2,4°	0,9°x0,7°
Фокусна відстань об'єктива (мм)	110	-	300
Роздільна здатність (ліній/мм)	40	-	—
Тепловізійний об'єктив			
Спектральний діапазон (мкм)	8-12	3-5	—

Продовження таблиці 1.1

Характер. \ Модель	«ОРЛАН»	«SPECTRO XR»	«САПСАН»
Фокусна відстань об'єктива (мм)	150	—	250
Формат матриці	320x240	640x512, 1280x1024, 1920x1080	—
NETD	0,1°	—	—
Кутове поле зору	4,5°-6°	1,0°, 3,7°	1,2°x0,9°
Габаритні розміри (мм)	700x580x520	415x500	820x310x240
Маса (г)	15000	52000	38000

Таблиця 1.2

Двоканальні оптико-електронні системи в ПТРК

Характерист. \ Модель	«Javelin»	«Корнет-ЭМ»	«M47 Dragon»
Зображення			
Ефективна дальність стрільби (м)	50-2500	Вдень: 100-3500 Вночі: 100-2280	65-950

1. Аналіз галузей використання багатоканальних оптико-електронних систем спостереження показав, що останніми роками спостерігається підвищений інтерес до таких систем, який обумовлений її високою інформативністю.

2. Серед багатоканальних оптико-електронних систем спостереження спостерігається тенденція використання для першого каналу $\Delta\lambda_1 = 0,4 \div 0,9$ мкм, довжини хвиль, а для іншого, $\Delta\lambda_2 = 8 \div 13$ мкм.

3. Аналіз сучасних двоканальних оптико-електронних систем спостереження виявив, що потрібна розробка двоканальної оптико-електронної системи спостереження з мінімізованими маса-габаритними характеристиками.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Мета математичного моделювання – це заміна реальної ОЕСС, дослідження якої викликає значні труднощі через її складність, сукупністю простіших елементів математичної моделі, допустимою для теоретичних досліджень. Математична модель простіша за саму систему, бо вона описує не усі особливості ОЕСС, а лише найважливіші для конкретного дослідження [12].

2.1 Узагальнена математична модель дистанційних спостережень

ОЕСС є інтерфейсом між вхідними даними від фоно-цільової обстановки та автоматичним блоком або оператором, який приймає рішення на основі аналізу зображення.

Схема математичної моделі процесу перетворення сигналів при дистанційних спостереженнях зображено на рисунку 2.1: *а* – з іконічними ОЕСС; *б* – з дистанційними ОЕСС. Основними блоками моделі є: ФЦО у складі фону, об'єктів, які знаходяться в полі зору ОЕСС, випромінюючих об'єктів за межами поля зору, а також атмосфери; ОЕСС у складі передавального блоку і монітора (для іконічних систем), а також модель спостерігача, яка окрім параметрів безпосередньо візуальної діяльності включає в себе умови спостереження і опис поточної зорової задачі [10].

Необхідно відмітити, що для випадку неавтоматичних дистанційних ОЕСС поточна задача спостереження у блоку вхідних даних відсутня.

Модель ФЦО містить в собі опис випромінюючих (або відбиваючих, розсіюючих) поверхонь, які утворюють об'єкт (або групу об'єктів), фон, заваду, розподіл випромінювання зовнішніх джерел, модель зовнішнього середовища (для переважної більшості випадків цим середовищем є атмосфера). Основними

характеристиками означених явищ є просторові, амплітудні, спектральні, часові та поляризаційні характеристики. Традиційним методом опису просторових характеристик ФЦО є застосування просторово-частотних або просторово-координатних математичних моделей. Як правило ці моделі ґрунтуються на теорії лінійних систем, а ваговими коефіцієнтами є енергетичні (здебільшого) або поляризаційні показники [10].

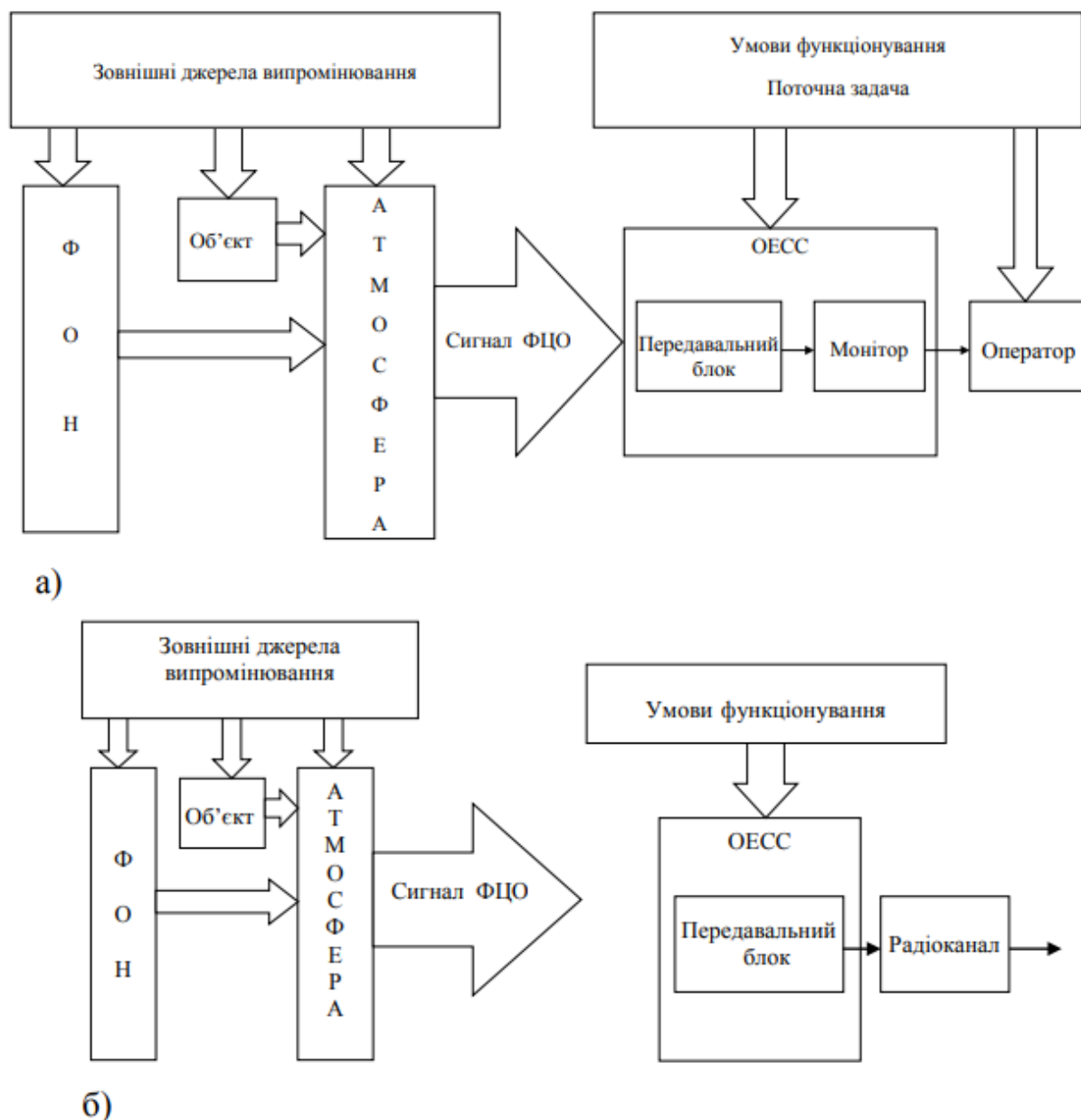


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема математичної моделі спостережень: *а* – з іконічними ОЕСС; *б* – з дистанційними ОЕСС [10]

2.2 Узагальнені характеристики ОЕСС

Для ОЕСС головні узагальнені характеристики – максимальна дальність виявлення (МДВ) та максимальна дальність розпізнавання (МДР) із певними заданими ймовірностями виявлення і розпізнавання. Ці характеристики залежать від просторової роздільної здатності; енергетичної роздільної здатності; функції передачі сигналу; передавальної функції; освітленості, еквівалентної шуму; еквівалентної шуму різниці температур (для ТПСС); мінімальної виявлювальної різниці температур (для ТПСС); мінімальної роздільної різниці температур (для ТПСС); мінімально роздільного контрасту (для ТВСС); спектрального робочого діапазону; динамічного діапазону [12].

Максимальна дальність виявлення (Maximum Detectable Range – MDR) R_d – це максимальна дальність між ОЕСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт виявляється на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_d у разі необмеженого часу спостереження [12].

Максимальна дальність розпізнавання (Maximum Recognizable Range – MRR) R_r – це максимальна дальність між ОЕСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт розпізнається на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_r у разі необмеженого часу спостереження [12].

Для ОЕСС важливе значення має якість сформованого зображення, яке суб'єктивно визначає спостерігач. Сприймаюча якість одного і того ж зображення істотно відрізняється у різних спостерігачів, а також змінюється у часі для одного спостерігача. Тому якість зображення не можна оцінювати в абсолютних величинах. Існують численні формули для оцінки якості зображення, кожна з яких отримана для конкретних умов спостереження емпіричним шляхом. Усі вони тією чи іншою мірою використовують дві основні характеристики – просторову й енергетичну роздільну здатність [12].

Існують різні методики розрахунку МДВ та МДР, в основі якої лежить визначення відношення сигнал/шум SNR на виході приймача випромінювання. Для визначення МДВ та МДР необхідно, перш за все, вказати тип об'єкту (цілі) і фону та їх характеристики, стан атмосфери, а також ймовірності виявлення та розпізнавання [12].

2.3 Характеристики оптичної системи

Оптико-електронні системи в приладах спостереження виконують такі функції:

1. Формують зображення у площині ПВ. При цьому має забезпечуватись необхідне просторове розділення (якість зображення) та енергетичне розділення (світлосила) [12].

2. Забезпечують просторовий аналіз у заданому полі зору.

Першу функцію виконує об'єктив, а другу – система сканування. Основна вимога до ОС – мати великий (достатній) коефіцієнт пропускання у робочому спектральному діапазоні $\lambda_1 \dots \lambda_2$.

Для математичного моделювання об'єктива будемо використовувати наступні його основні характеристики:

- Фокусна відстань f' ;
- Діаметр вхідного зіниці $D_{вх}$;
- Діафрагмове число k_{eff} ;
- Кут поля зору 2ω ;
- Спектральний $\tau_o(\lambda)$ та інтегральний τ_o коефіцієнти пропускання.

Обрані характеристики дозволяють моделювати ОС з метою габаритного і енергетичного розрахунків, а також здійснювати аналіз і синтез оптико-електронної системи спостереження [8, 12].

Спрощену схему об'єктива ОЕСС зображено на рисунку 2.2. Дія об'єктива у цій схемі описується головними площинами H, H' та фокусами F, F' , розміщення яких залежить від конкретної ОС (радіусів кривизни поверхонь, що заломлюють та відбивають промені, товщини оптичних середовищ, показників заломлення). Якщо об'єктив міститься у повітрі, то його передня та задня фокусні відстані зв'язані співвідношенням $-f_o = f'_o > 0$. Відстань a' від задньої головної площини до ПВ та відстань a від передньої головної площини до об'єкта зв'язані між собою формулою відрізків [8]

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'_o}. \quad (2.1)$$

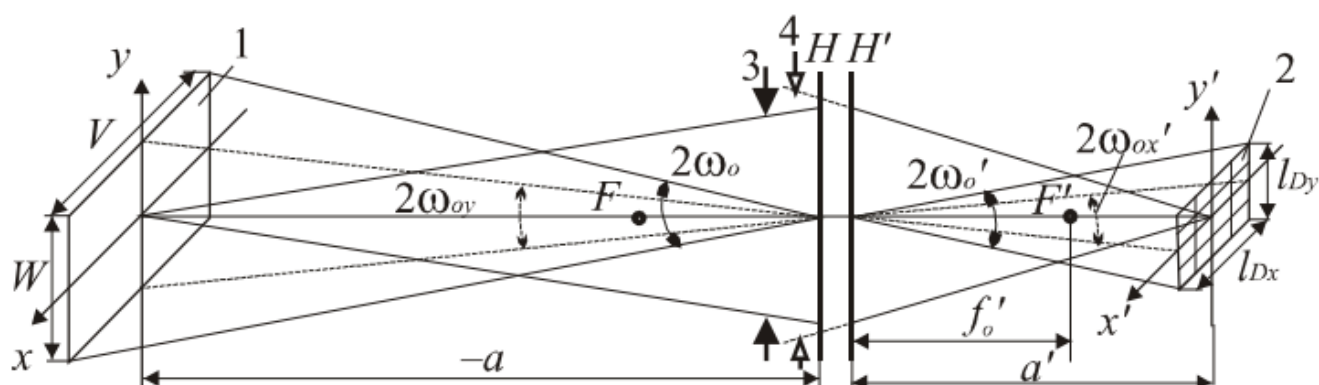


Рисунок 2.2 – Схема ідеальної ОС [12]: 1 – площина предметів;
2 – площина зображення; 3 – вхідна зіниця; 4 – вихідна зіниця

Здатність об'єктива концентрувати енергію випромінювання характеризується енергетичною спектральною освітленістю E'_{e0} , яка формується на чутливій поверхні матриці при заданій енергетичній яскравості об'єкта L_{et} . Для осьової точки осесиметричної ОС спектральну освітленість визначають за формулою [12]:

$$E'_{e0}(\lambda) = \frac{\pi \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) L_{t\lambda}(\lambda)}{4k_{eff}^2}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{МКМ}}, \quad (2.2)$$

де $\tau_A(\lambda)$ і $\tau_o(\lambda)$ – спектральні коефіцієнти пропускання атмосфери і об'єктива відповідно; k_{eff} – діафрагмове число об'єктива.

$$k_{eff}^2 = \frac{f_o'^2}{D_p^2 - D_i^2}, \quad (2.3)$$

де D_p і D_i – зовнішній і внутрішній діаметри вхідної зіниці відповідно. Для лінзових систем $D_i = 0$. Для дзеркального об'єктива у випадку, коли об'єкт розташований у нескінченності, діаметр D_i дорівнює діаметру малого дзеркала.

За межами осьової точки освітленість зменшується. Навіть якщо пучок променів повністю проходить через апертурну діафрагму, конуси променів, які формують зображення, стають тоншими. У першому наближенні ця залежність описується виразом [8]

$$E_e'(\omega') = E_{e0}' \cdot \cos^4 \omega', \quad (2.4)$$

де ω' – кут поля зору у просторі зображень.

Поле зору ОС можна задавати як у лінійних, так і в кутових величинах як у просторі предметів, так і у просторі зображень. У більшості випадків кутове поле зору об'єктива у просторі предметів $2\omega_o$ збігається з полем зору у просторі зображень $2\omega'_o$, тобто $2\omega_o = 2\omega'_o$ [12].

Із рисунка 2.2 випливають кілька формул для розрахунку поля зору об'єктива:

$$2\omega_o = \sqrt{(2\omega_{ox})^2 + (2\omega_{oy})^2}; \quad (2.5)$$

$$2\omega_{ox} = 2 \arctg \frac{l_{Dx}}{2a'}; \quad 2\omega_{oy} = 2 \arctg \frac{l_{Dy}}{2a'}; \quad (2.6)$$

де $2\omega_{ox} \times 2\omega_{oy}$ – кутові поля зору уздовж відповідних осей; $l_{Dx} \times l_{Dy}$ – лінійне поле зору у площині зображення (розмір МПВ).

Якщо об'єкт міститься на значній відстані від ОЕСС ($-a = R \gg f_o'$), то ПВ потрібно розміщувати в задній фокальній площині об'єктива. При цьому $a' = f_o'$, а $\beta' = 0$.

Таким чином, поле зору ОЕСС визначають розмірами ПВ, фокусною відстанню об'єктива, а також параметрами системи сканування та телескопічної насадки.

Якщо ОЕСС використовує МПВ з числом елементів (пікселів) $p_D \times q_D$, рівним числу елементів розкладу зображення, то кути поля зору визначають із рівняння:

$$\begin{pmatrix} \text{tg} \omega_{ox} \\ \text{tg} \omega_{oy} \end{pmatrix} = \frac{1}{2f_o'} \begin{pmatrix} p_D V_D \\ q_D W_D \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Важливе значення для передачі випромінювання від об'єкта до ПВ має апертурна діафрагма, а також її зображення у просторі об'єктів та просторі зображень – вхідна та вихідна зіниці відповідно. Апертурна діафрагма – це той отвір в ОС, який обмежує пучок променів, що падають на осьову точку ПВ. Вона має форму круглого отвору в лінзових системах і форму кільця в дзеркальних системах [18].

2.4 Характеристики приймачів випромінювання

Приймач випромінювання (ПВ) – найважливіший елемент ОЕСС, де він здійснює перетворення слабких потоків випромінювання з низьким контрастом в електричний сигнал [12, 25].

Для моделювання матричного приймача випромінювання, потрібно знати наступні параметри:

- Формат матриці $p_D \times q_D$;
- Розмір пікселя $v_D \times w_D$, мкм²;
- Період матричної структури приймача $V_D \times W_D$, мкм²;

- Спектральна чутливість R_D , В/Вт ;
- Потужність, еквівалентна шуму NEP ;
- Виявлювальна здатність D^* ;
- Питому виявлювальну здатність D^* ;
- Освітленість, еквівалентну шуму E_n .
- Частота зчитування кадру f_f .

Чутливість R_D – це відношення електричного сигналу (напруги u_s або струму i_s) до оптичного сигналу (потіку випромінювання Φ_e' , освітленості E_e' , експозиції H_e'), який падає на чутливу площадку ПВ і створює електричний сигнал [12]:

$$R_D = \frac{u_s}{\Phi_e'}, \frac{\text{В}}{\text{Вт}}. \quad (2.8)$$

Спектральну чутливість $R_D(\lambda)$ визначає, перш за все, матеріал чутливого елемента ПВ. Більшість ПВ мають захисні вікна, які виконують роль додаткового спектрального фільтра.

Потужність, еквівалентна шуму NEP (Noise Equivalent Power), або пороговий потік $\Phi_{e,min}$ – це таке значення потоку випромінювання, що створює на виході ПВ сигнал, який дорівнює середньоквадратичному значенню шуму u_n у заданій смузі частот [12]:

$$NEP = \Phi_{e \min} = \frac{u_n}{R_D}. \quad (2.9)$$

Питома виявлювальна здатність D^* характеризує шумові властивості ПВ і визначається за формулою

$$D^* = \frac{\sqrt{A_D \Delta f}}{NEP}, \frac{\text{см} \cdot \sqrt{\text{Гц}}}{\text{Вт}}, \quad (2.10)$$

де A_D – площа чутливої площадки ПВ, см^2 .

Із формул (2.9) і (2.10) можна встановити зв'язок між чутливістю R_D і питомою виявлювальною здатністю D^* :

$$R_D = D^* \frac{u_n}{\sqrt{A_D \Delta f}}. \quad (2.11)$$

Освітленість, еквівалентну шуму E_n визначають із умови рівності числа фотонів N_{ph} , які падають на чутливу площадку за умови рівномірної освітленості E_n за час накопичення (інтегрування) t_i , числа фотонів N_n , які відповідають шумовому сигналу u_n ПВ [12]. При цьому

$$N_{ph} = E_n k_{oe} A_D t_i; \quad (2.12)$$

$$N_n = \frac{u_n}{k_{ue} \eta_D}, \quad (2.13)$$

де $k_{eo} = 10^{16}$ – перевідний коефіцієнт, фотон/(лм·с); k_{ue} – коефіцієнт перетворення ПВ, В/електрон; η_D – квантова ефективність, електрон/фотон.

Сформулюємо спрощену математичну модель пристрою з ПЗЗ-матрицею, з огляду на первинну схему обробки інформації. Математична модель даного приладу зводиться до визначення сигналу з приймача [6].

Можна вважати, що сигнал на виході з приймача випромінювання записується формулою:

$$U = k_m \int_{0,45}^{0,75} \Phi_{ПВ}(\lambda) S_{ПВ}(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda \quad (2.14)$$

де U – сигнал на виході приймача випромінювання; k_m – коефіцієнт, що враховує втрати потужності сигналу за рахунок модуляції та інших перетворень сигналу в електронному тракті; $\Phi_{ПВ}(\lambda)$ – потік, що приходить на приймач випромінювання як функція довжини хвилі випромінювання λ ; $S_{ПВ}(\lambda)$ – спектральна характеристика вольтової чутливості приймача випромінювання; $\tau_0(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання прийомної оптичної системи.

Розглянемо за якою формулою можна знайти потік, що приходить на приймач випромінювання. Значення $\Phi_{\text{ПВ}}(\lambda)$ розраховується за формулою :

$$\Phi_{\text{ПВ}}(\lambda) = \frac{\pi I \tau_{oc} \tau_{mc} D_{\text{ВХ}}^2}{4l^2}, \quad (2.16)$$

де $D_{\text{ВХ}}^2$ - площа входної зіниці; I - сила світла; τ_{oc} - коефіцієнт пропускання оптики; τ_{mc} - коефіцієнт пропускання молочного скла; l - відстань від джерела випромінювання до входної зіниці камери.

За допомогою цих формул можна розрахувати сигнал, який отримується після проходження приймача випромінювання. Далі цей сигнал поступає на попередній підсилювач, потім на інтерфейс та комп'ютер, де проводиться подальша обробка сигналу (вимірювання, розпізнавання, зчитування та ін.)

Підставивши формулу (2.16) в формулу (2.15) отримаємо:

$$U = k_m \int_{0,45}^{0,75} \frac{\pi I \tau_{oc} \tau_{mc} D_{\text{ВХ}}^2}{4l^2} S_{\text{ПВ}}(\lambda) d\lambda \quad (2.17)$$

2.5 Максимальна дальність виявлення ТПСС

Вихідною для одержання рівняння для розрахунку МДВ є рівняння мінімальної виявлювальної різниці температур $MDTD$ температурному контрасті ΔT об'єкта. Функцію $MDTD(v_x)$ визначають за допомогою формули [12]:

$$MDTD(\xi_{tp}) = \frac{NETD \cdot SNR_d}{\bar{L}_{S,n}} \left(\frac{\alpha_D \beta_D}{2 \xi_{tp}^2 t_o \Delta f \cdot f_f t_E} \right)^{0,5}, \quad (2.17)$$

для просторової частоти $v_x = 1/2\xi_t$, де ξ_t - кутовий розмір об'єкта [9], як

$$\Delta T = MDTD \left(\xi_t = \frac{1}{2v_x} \right) = \frac{NETD \cdot SNR_d}{\bar{L}_{S,n}(v_x)} v_x \sqrt{\frac{2\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_o f_f t_E}} \quad (2.18)$$

де параметр $NETD$ - еквівалентна шуму різниця температур визначають формулою:

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (2.19)$$

Після підстановки закону Бугера (2.15) з урахуванням для коефіцієнта пропускання атмосфери та значення $NETD$ (2.19) в $MRTD(v_x)$, отримуємо трансцендентне рівняння для пошуку МДВ [12]:

$$\exp(-k_A R_d) = \Delta T \frac{\bar{L}_{S,n}(v_x) \tau_o}{4k_{eff}^2 SNR_d v_x} \sqrt{\frac{t_0 f_f t_E A_D}{2\alpha_D \beta_D}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda \quad (2.20)$$

Рівняння (2.20) можна спростити, якщо врахувати, що об'єкти будуть малих розмірів, тобто $\xi_t < \alpha_D$. При реєструванні випромінювання на чутливу ділянку пікселя буде потрапляти інформація як від фону, так і від об'єкта, тому рівняння для виявлення МДВ можна записати в наступному вигляді [12]:

$$R_d^3 \exp(k_A R) = \frac{\bar{L}_{S,n}}{SNR_d} \sqrt{\frac{2t_0 f_f t_E}{\alpha_D \beta_D A_D}} \frac{A_p \tau_o V_t A_t}{\pi} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\varepsilon_1 M_\lambda - \varepsilon_b M_\lambda] D^*(\lambda) d\lambda \quad (2.21)$$

Вважається об'єкт спостереження має малі розміри, тобто $\xi_t < \alpha_D$, де

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{v_D}{f} \quad (2.22)$$

Для ефективних температур об'єкта і фону рівняння (2.22) матиме вигляд:

$$R_d^3 \exp(k_A R) = \frac{\bar{L}_{S,n}}{SNR_d} \left(\frac{2t_0 f_f t_E}{\alpha_D \beta_D A_D} \right)^{0.5} \frac{A_p \tau_o l_{cr} A_t}{\pi} I, \quad (2.23)$$

де I – інтеграл, ΔT – температурний контраст:

$$I = \Delta T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} D^*(\lambda) d\lambda \quad (2.24)$$

Розрахуємо інтеграл I , в якому для виявлення питомої виявлювальної здатності $D^*(\lambda)$ використовуємо параметр МПВ $NETD$. Цей параметр визначимо за формулою [9]:

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\sqrt{2t_0A_D} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda} \quad (2.25)$$

Тоді інтеграл (2.24) матиме вигляд:

$$I = \Delta T \frac{4 k_{eff}^2}{NETD \sqrt{2t_0A_D}}, \quad (2.26)$$

Середнє нормоване значення яскравості зображення об'єкта $\overline{L_{S,n}}(\xi''_t)$ визначимо з таблиці 2.1. Для цього потрібно знати відношення кутового розміру зображення об'єкта ξ''_t до радіуса кружка розсіювання r_s [12].

Таблиця 2.1

Значення нормованого розподілу яскравості зображення тест-об'єкта на екрані дисплея $\overline{L_{S,n}}$, яке сприймає око, залежно від нормованого кутового розміру тест-об'єкта ξ''_{tp} / r_s

ξ''_t / r_s	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\overline{L_{S,n}}$	0	0.084	0.174	0.256	0.327	0.387	0.438	0.481	0.519
ξ''_t / r_s	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$\overline{L_{S,n}}$	0.551	0.58	0.605	0.628	0.648	0.666	0.682	0.697	0.71
ξ''_t / r_s	18	19	20	21					
$\overline{L_{S,n}}$	0.723	0.734	0.744	0.753					

З урахуванням інтегралу (2.26) остаточне рівняння матиме вигляд:

$$R_d^3 \exp(k_A R) = \frac{\overline{L_{S,n}}}{SNR_d} \left(\frac{f_f t_E}{\alpha_D \beta_D} \right)^{0.5} \frac{A_p \tau_0 V_t A_t}{\pi A_D} \frac{4\Delta T}{NETD} \quad (2.27)$$

2.6 Максимальна дальність розпізнавання ТПСС

Вихідними при одержанні рівняння для розрахунку МДР є рівність мінімальної роздільної різниці температур $MRTD(v_x)$: температурному контрасту об'єкта ΔT і критерій Джонсона [12].

$$MRTD(v_x) = \frac{0.66 \cdot SNR_d v_x}{M_s(v_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_0 f_f t_E}} NETD \quad (2.28)$$

де α_D та β_D – кутові розміри чутливої площадки пікселя приймача випромінювання по горизонталі та вертикалі, f_f – частота зчитування кадру, t_E – час сприйняття оком інформації,

Відповідно до цього критерію для розпізнавання об'єкта необхідно, щоб уздовж його критичного розміру $l_{cr} = V_t$ розташовувалося чотири періоди штрихової міри Фуко. З геометричних міркувань легко визначити просторову частоту, що відповідає розпізнаванню за критерієм Джонсона, мрад⁻¹ [12]:

$$v_{xr} = \frac{4 R_r}{V_t} \quad (2.29)$$

Відношення сигнал/шум така система у зображенні, що сприймає оператор з дисплея матиме вигляд [9]:

$$SNR_r = \frac{0.379 \Delta T M_s(v_{xr}) V_t}{NETD \cdot R_r} \sqrt{\frac{\Delta f t_0 f_f t_E}{\alpha_D \beta_D}} \quad (2.30)$$

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}} \quad (2.31)$$

Підставимо вираз для $NETD$ (2.31) у (2.30). Якщо температурний контраст об'єкта $\Delta T = T_t - T_b$ дорівнює різниці температур міри Фуко, тобто $\Delta T = MRTD$, то із співвідношення (2.31) знайдемо рівняння для розрахунку МДР [12]:

$$\frac{R_r^3}{M_s \left(\frac{4R_r}{V_t} \right)} = \Delta T \frac{0.12 V_t A_p A_t}{SNR(P_r)} \sqrt{\frac{t_0 f_f t_E}{\alpha_D \beta_D A_D}} \tau_0 \varepsilon_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda \quad (2.32)$$

Після підстановки закону Бугера для коефіцієнта пропускання атмосфери та (2.31) в (2.32), а також врахуємо, що система обмежена шумами, отримуємо трансцендентне рівняння для пошуку МДР:

$$\begin{aligned} \Delta T_0 \exp(-k_A R_r) &= MDTD \left(v_x = \frac{N_r R_r}{l_{cr}} \right) = \\ &= 0.66 \cdot SNR_E \frac{N_r R_r}{l_{cr}} \frac{NETD}{M_s \left(\frac{N_r R_r}{l_{cr}} \right)} \sqrt{\frac{2\alpha_D \beta_D}{f_f t_E}}, \end{aligned} \quad (2.33)$$

де l_{cr} – критичний розмір об'єкта (для двовимірної моделі $l_{cr} = \sqrt{V_t W_t}$) в якому розміщуються N_r штрихів, за критерієм Джонсона,

$$M_s \left(v_x = \frac{N_r R_r}{l_{cr}} \right) = \exp \left(-2\pi^2 r_s^2 \left(\frac{N_r R_r}{l_{cr}} \right)^2 \right) \quad (2.34)$$

$r_s = 0.28 \sqrt{\alpha_D \beta_D}$ – апроксимоване значення кружка розсіювання,

SNR_E – відношення сигнал/шум, що сприймає оператор, яке знаходиться знаходимо із таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Залежність ймовірності розпізнавання P_r від відношення
сигнал/шум SNR_E або від числа (N_r/N_D) [12]

SNR_E (N_r/N_D)	P_r	SNR_E (N_r/N_D)	P_r	SNR_E (N_r/N_D)	P_r
0	0,000	1,0	0,500	2,0	0,945
0,1	0,002	1,1	0,582	2,1	0,957
0,2	0,010	1,2	0,656	2,2	0,966
0,3	0,029	1,3	0,721	2,3	0,973
0,4	0,061	1,4	0,776	2,4	0,979

Продовження таблиці 2.2

SNR_E (N_r/N_D)	P_r	SNR_E (N_r/N_D)	P_r	SNR_E (N_r/N_D)	P_r
0,5	0,108	1,5	0,821	2,5	0,983
0,6	0,169	1,6	0,858	2,6	0,987
0,7	0,243	1,7	0,887	2,7	0,990
0,8	0,326	1,8	0,911	2,8	0,992
0,9	0,413	1,9	0,930	2,9	0,994

Отже, розв'язавши рівняння відносно R_r буде знайдено МДР.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\exp\left(-k_A R_r - 2\pi^2 r_s^2 \left(\frac{N_r R_r}{\sqrt{V_t W_t}}\right)^2\right)}{R_r} = \\
 & = \frac{0.66 \cdot SNR_E \cdot N_r \cdot NETD}{\Delta T_0 \sqrt{V_t W_t}} \sqrt{\frac{2\alpha_D \beta_D}{f_f t_E}} \quad (2.35)
 \end{aligned}$$

Висновки до розділу 2

У розділі 2 було розглянуто математичну модель дистанційних спостережень, модель оптичної системи та приймача випромінювання. Визначено основні характеристики ОЕСС та приведено формули для їх розрахунку. Розглянуто варіанти розрахунку головних параметрів ОЕСС тепловізійного каналу, максимальної дальності виявлення та максимальної дальності розпізнавання. Результати даного розділу дають підґрунтя для вирішення задач, що наведені в наступному розділі, а саме проектування ОЕСС зі зменшеними маса-габаритними характеристиками.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДВОКАНАЛЬНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

В даному розділі буде проведений аналіз моделі ОЕСС для мінімізації оптичного вхідного блоку, вибір компонентів ОС, її розробка з мінімальними габаритами та виконаний енергетичний розрахунок розробленої системи. Буде виконана розробка рекомендацій щодо схемо-технічних рішень двоканальних оптико-електронних систем спостереження.

3.1 Методи мінімізації оптичного вхідного блоку

Завданням даного підрозділу є дослідження параметрів компонентів оптико-електронної системи, варіантів компоновки оптичних схем та огляд їх впливу на маса-габаритні характеристики системи.

Конструкція оптичної системи є важливим фактором впливаючим на її габаритні характеристики. Використання об'єктивів в складі оптичних елементів яких є дзеркальні (відбиваючі) поверхні дозволяють зменшити повздовжні розміри оптичної системи в декілька разів, відносно лінзових об'єктивів (при рівному діаметрі і фокусній відстані, рис. 3.1).

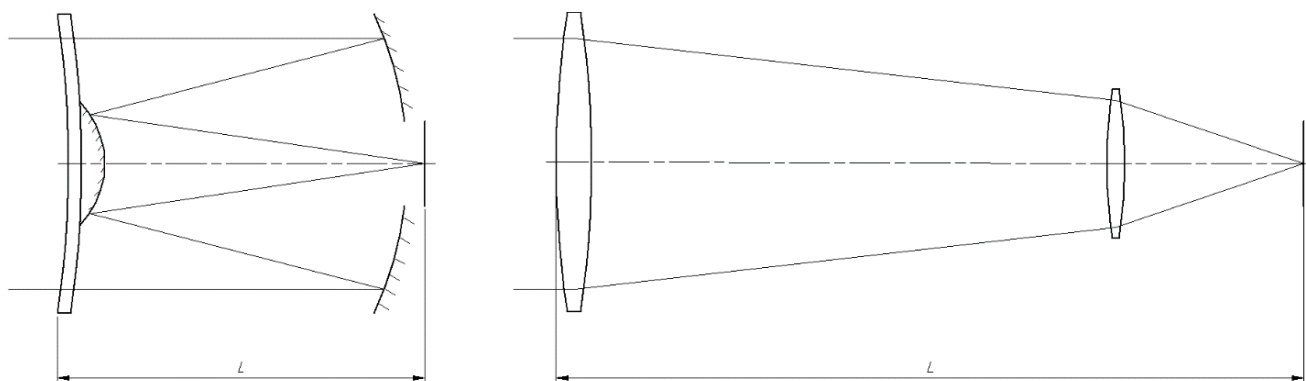


Рисунок 3.1 – Дзеркальний та лінзовий об'єктиви

Проте, енергетичні параметри системи з катоптрикою будуть дещо гірше, у зв'язку з центральним екрануванням вхідної зіниці об'єктива вторинним дзеркалом. Залежність діаметра вхідної зіниці (D_{pl}) лінзового об'єктива від діаметра вхідної зіниці дзеркального об'єктива (D_{pm}), при рівних фокусних відстанях (f'_{06}) можливо знайти з формули (2.3). Підставивши значення лінзового об'єктива в ліву частину рівняння, а дзеркального в праву, отримуємо:

$$\frac{f'_{06}{}^2}{D_{pl}^2} = \frac{f'_{06}{}^2}{D_{pm}^2 - (D_{im} \cdot k)^2}, \quad (3.1)$$

$$D_{pl} = \frac{D_{pm}}{\sqrt{1-k^2}}, \quad (3.2)$$

де k – коефіцієнт екранування.

З урахуванням рівняння (3.1) було змодельовано графік залежності об'єму оптичної системи лінзового та дзеркальних об'єктивів при збільшенні їх фокусної відстані.

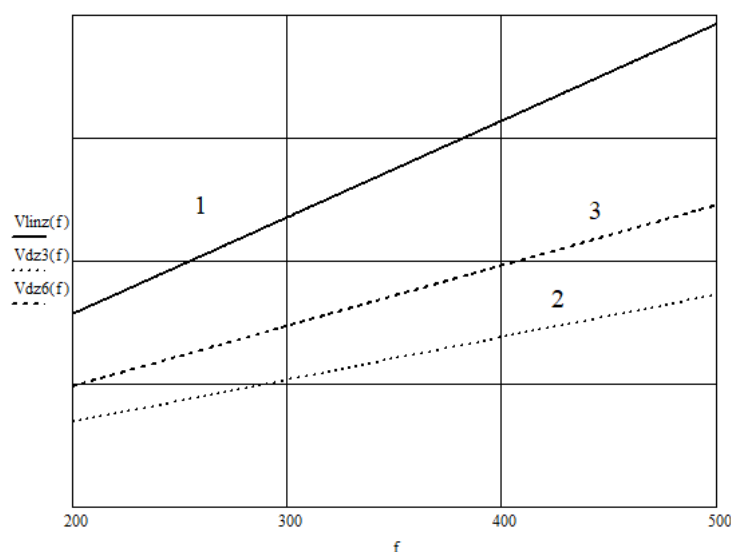


Рисунок 3.2 – Залежність збільшення фокусної відстані до загального об'єму об'єктива в: 1 – лінзовій системі;

2 – дводзеркальній системі ($k = 0,3$); 3 – дводзеркальній системі ($k = 0,6$)

Додатково, для мінімізації масових характеристик ОС необхідно враховувати щільність матеріалу оптичних деталей, яка повинна бути найбільш можливо меншою.

У таблиці 3.1 приведені деякі оптичні матеріали, прозорі в вищевказаних діапазонах спектру з щільністю від $1,98 \text{ г/см}^3$. З таблиці 3.1 видно, що найбільш відповідним матеріалом по щільності для двухканального об'єктива системи спостереження є хлорид калію (KCl).

Таблиця 3.1

Характеристики оптичних матеріалів

Матеріал	$\Delta\lambda$, мкм	$\Delta\tau(\lambda = 0,4 - 12 \text{ мкм})$	Щільність, г/см^3
Фтористий барій(BaF_2)	0,1-13,4	0,89-0,4	4,89
Бромід калію (KBr)	0,2-30	0,9-0,92	2,753
Хлорид калію (KCl)	0,2-26	0,88-0,9	1,98
Натрій хлористий (NaCl)	0,2-22	0,86-0,89	2,17

З рівняння виходу сигналу ТВОЕС сигналу виходу видно, що додатковим чинником впливаючим на габарити ОЕСС є коефіцієнт пропускання оптичної системи (τ_0). Оптична система об'єктива ОЕСС повинна бути виконана з мінімальною можливою кількістю елементів, що її формують. Матеріали лінз повинні бути мінімізовані в плані відбивання, та поглинання випромінювання. Робочі поверхні лінз мають бути покриті просвітляючими покриттями. Ці три фактори при синтезі оптичної системи прямо впливають на її габарити. На рис. 3.2 зображено графік залежності енергетичної освітленості на матриці від коефіцієнта пропускання випромінювання об'єктивом.

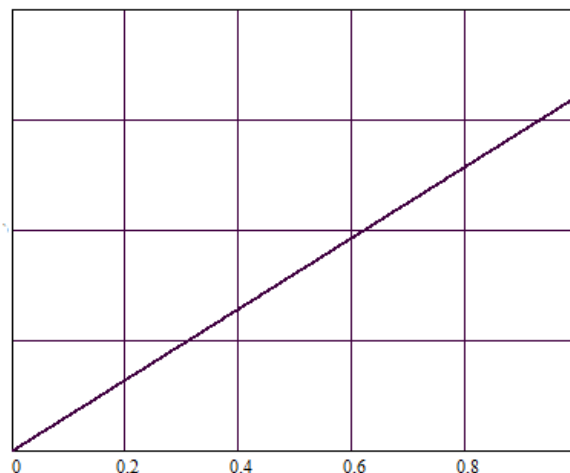


Рисунок 3.3 – Залежність енергетичної освітленості МПВ від коефіцієнта пропускання випромінювання об’єктивом

Збільшивши коефіцієнт пропускання випромінювання об’єктивом з 0.5 до 0.7 можна додатково зменшити площу вхідної зіниці в 1.2 рази.

При виборі матричного приймача випромінювання важливим фактором є його чутливість, розмір пікселя та інерційність компонента. Нажаль, перші дві характеристики залежні формулою (2.11) з якої видно, що зменшення чутливого елемента ПВ призводить до погіршення його чутливості. Компенсувати даний недолік можливо підвищивши частоту опитування елементів f_f , адже Δf – ефективну шумову смугу можна виразити через рівняння:

$$\Delta f = \frac{2\omega_{ox}f_f}{2\alpha_D}. \quad (3.3)$$

3.2 Варіанти сполучення каналів ДКОЕСС

Оптична система приладу складається з двох блоків: приймальний для видимого спектру випромінювання та приймальний для ІЧ-випромінювання. З рис. 1.9 видно що варіанти сполучення оптичних схем двох приймальних блоків відрізняються один від одного. Оскільки головною задачею даної роботи є зменшення маса-габаритних розмірів ДКОЕСС, доречно виконати розміщення оптичних схем

обох приймальних блоків в одному тубусі, з одним вхідним вікном (рис. 3.4). Для цього в ОС вводиться спектроподільний елемент. Зазвичай, цю роль виконує спектроподільна пластина (рис. 3.1а), на яку наноситься спектроподільне покриття. Крім того, виконувати функції спектроділника може звичайна лінза (рис. 3.4а), котра працює як вторинне дзеркало для одного каналу ОЕСС, і як звичайний лінзовий компонент для іншого.

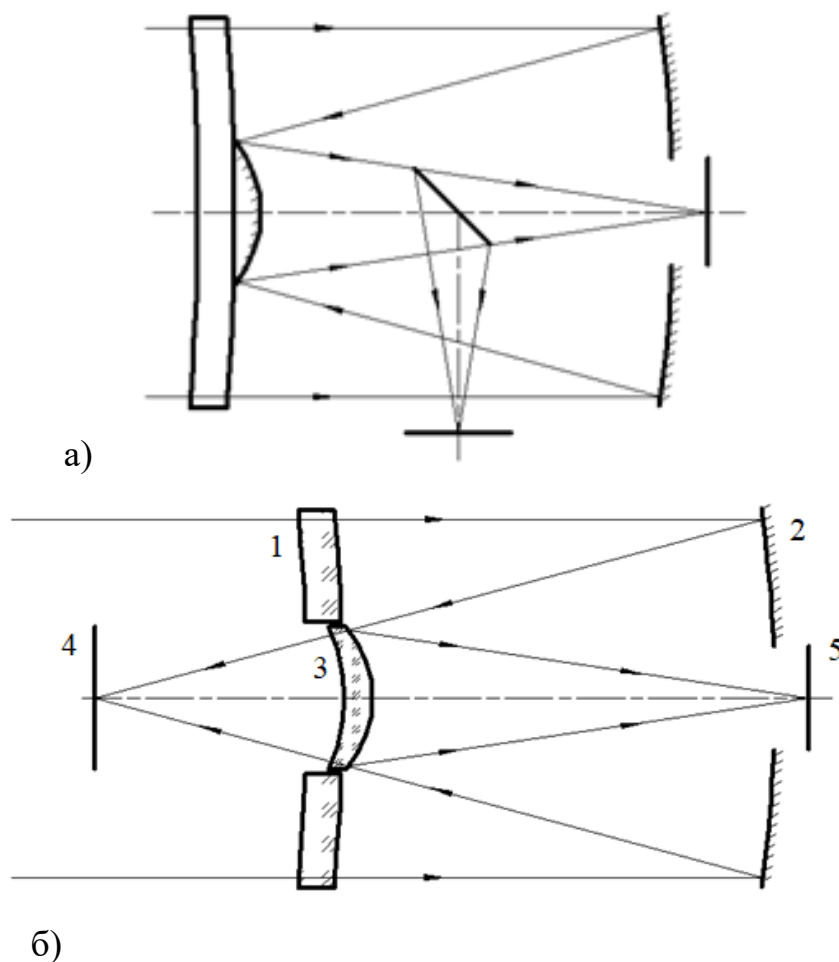


Рисунок 3.4 – Запропоновані схеми вхідного блоку двоканальної системи спостереження

3.3 Габаритний розрахунок приладу

При проектуванні ДКОЕСС будемо використовувати математичну модель ОЕСС розглянуту в розділі 2. ДКОЕСС складається з таких основних елементів: двох

конструктивно поєднаних об'єктів та двох матричних приймачів випромінювання, для видимого випромінювання (КМОН) та ІЧ-випромінювання (МБМ). Виходячи з того, що найбільшого використання ДКОЕСС знайшли в військовій справі, дана система буде розраховуватися для подальшого встановлення в протитанковий ракетний комплекс. Проаналізувавши таблицю 1.3 формуємо вихідні дані для подальшого розрахунку.

Вихідні дані:

1. Довжина хвилі $\Delta\lambda_1 = 0,4 \div 0,9$ мкм, $\Delta\lambda_2 = 8 \div 12$ мкм;
2. Кут поля зору – $2\omega \geq 6^\circ$;
3. Габаритні розміри оптичної системи повинні бути мінімальними.

Для синтезу двоканальної оптико-електронної системи спостереження, потрібно обрати матричні приймачі випромінювання, відносно заданих довжин хвиль та розрахувати фокусну відстань об'єктива відносно обраних МПВ забезпечивши заданий кут поля зору ДКОЕСС.

Матричний приймач випромінювання тепловізійного каналу буде побудований на базі неохолоджуваної мікроболометричної матриці BAE SYSTEMS TWV640 (див. додаток А), а телевізійного каналу на базі КМОН матриці ON Semiconductor NOIX2SE9400B-LTI1 (див. додаток Б).

Фокусна відстань об'єктива вираховується згідно 2-го критерія узгодження роздільної здатності (МПФ) об'єктива і матричного приймача випромінювання.

Знаючи роздільну здатність матричних приймачів випромінювання $p_D \times q_D = 640 \times 480$ та 3072×3072 , для мікроболометричного та КМОН МПВ відповідно та розмір одного пікселя $V_D \times W_D = 12 \times 12$ та $3,2 \times 3,2$ [мкм], для МБМ та КМОН МПВ відповідно, розрахуємо їх вертикальні та горизонтальні розміри чутливої зони, та діагоналі МПВ.

Горизонтальні та вертикальні розміри чутливої зони МПВ визначаємо формулами:

$$l_{Dx} = p_D \cdot V_d, \quad (3.4)$$

$$l_{Dy} = q_D \cdot W_d. \quad (3.5)$$

Підставивши кількість пікселів та розмір одного пікселя у формули (3.4, 3.5), для МБМ МПВ отримуємо:

$$l_{Dx,mbm} = 640 \cdot 12 = 7680 \text{ мкм} = 7,68 \text{ мм},$$

$$l_{Dy,mbm} = 480 \cdot 12 = 5760 \text{ мкм} = 5,76 \text{ мм}.$$

Оскільки КМОН МПВ має відношення сторін 1:1, то для обох розмірів можна виконати один розрахунок:

$$l_{Dx,cmos} = l_{Dy,cmos} = 3072 \cdot 3,2 = 9830 \text{ мкм} = 9,83 \text{ мм}.$$

Порахувавши довжини і широти обох МПВ можна розрахувати їх діагоналі формулою:

$$d = \sqrt{l_{Dx}^2 + l_{Dy}^2}. \quad (3.6)$$

Діагональ МБМ МПВ дорівнює:

$$d_{mbm} = \sqrt{7,68^2 + 5,76^2} = 9,6 \text{ мм},$$

діагональ КМОН МПВ дорівнює:

$$d_{cmos} = \sqrt{9,83^2 + 9,83^2} = 13,9 \text{ мм}.$$

Наступним кроком є розрахунок фокусних відстаней об'єктивів за допомогою формули:

$$f'_{об} = \frac{d}{2 \cdot \tan(\omega)}. \quad (3.7)$$

Так фокусна відстань об'єктива для МБМ МПВ дорівнює:

$$f'_{об,mbm} = \frac{9,6}{2 \cdot \tan(3)} = 91,7 \text{ мм},$$

а для КМОН МПВ відповідно:

$$f'_{об,cmos} = \frac{13,9}{2 \cdot \tan(3)} = 132 \text{ мм}.$$

Параметричний синтез об'єктива виконувався окремо для кожного каналу у системі автоматизованого проектування оптичних систем «PODIL». Задавши необхідні параметри для каналу видимого спектру ОС, такі як: довжини хвиль

випромінювання ($\Delta\lambda = 0,4 \div 0,9$), фокусна відстань ($f'=132$ мм) та кутове поле зору ($\omega = 3^\circ$). Було сформовано об'єктив з параметрами наведеними у таблиці 3.2. Радіуси кривизни поверхні виконані згідно стандарту.

Таблиця 3.2

Параметри об'єктива видимого спектра

№ Поверхні	Радіус кривизни, мм	Осьова відстань, мм	Світовий діаметр, мм	Марка скла
1(АД)	114,29	5,00	66,000	KCl
2	143,88	40,00	65,519	—
3	-122,74	-34,70	65,960	Дзеркало
4	-104,71	21,42	32,589	Дзеркало
5	-129,12	3,72	21,697	N-PSK53
6	-75,68	1,19	20,901	—
7	200,40	3,50	19,667	SF6G05
8	24,65	3,05	17,551	—
9	38,90	3,84	18,220	N-SF11
10	34,75	2,65	18,375	—
11	25,82	4,40	21,002	SF4
12	-361,40		20,691	—

Радіуси компонентів виконано згідно вимогам стандарту. Графіки астигматизму, кривизни поля та дисторсії, точкова діаграма на графік функції концентрації енергії каналу видимого спектру наведені в додатку В. Графік МПФ

об'єктива видимого спектру та двовимірна модель зображено на рисунках 3.5 та 3.7 відповідно.

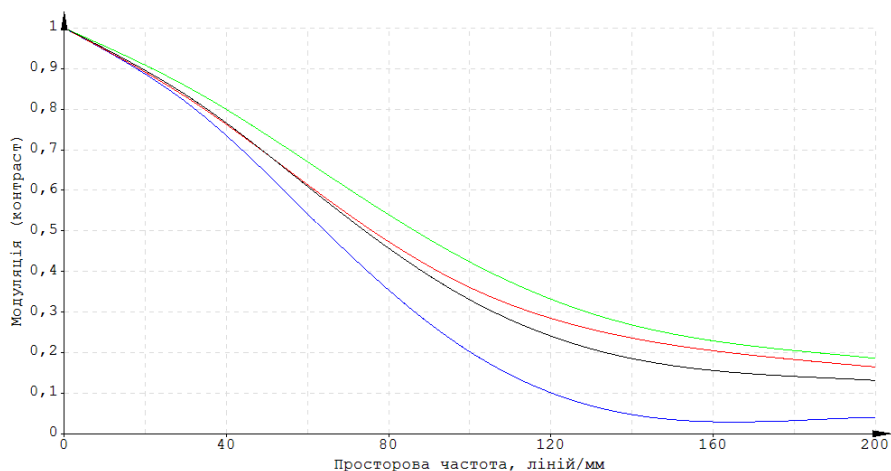


Рисунок 3.5 – МПФ об'єктива видимого діапазону для чотирьох кутів поля зору $\omega = \{0^\circ, 1,5^\circ, 2,4^\circ, 3^\circ\}$

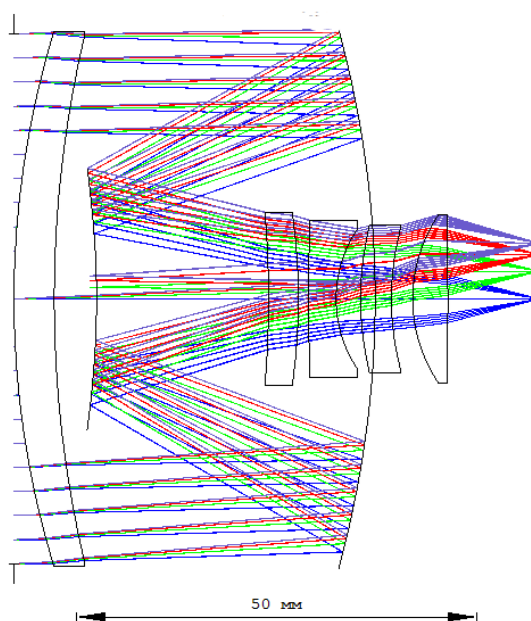


Рисунок 3.6 – Оптична схема каналу видимого спектра випромінювання

Наступним кроком в проектуванні двоканального об'єктиву є синтез каналу ІЧ-випромінювання. Ідентично до каналу видимого діапазону, задаємо всі необхідні параметри каналу ІЧ-спектру ОС, але виключаємо зі змінних в функції оптимізації

перші чотири поверхні (по ходу променів). В редакторі оціночної функції вносимо головні параметри під які необхідно оптимізувати систему. Після глобальної оптимізації ми отримуємо об'єktiv з параметрами наведеними у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Параметри об'єктива ІЧ-спектра

№ Поверхні	Радіус кривизни, мм	Осьова відстань, мм	Світовий діаметр, мм	Марка скла
1(АД)	114,29	5,00	66,000	КСІ
2	143,54	40,00	65,615	—
3	-122,74	-34,70	65,992	Дзеркало
4	-104,71	-2,02	32,546	Германій
5	-44,98*	-9,93	30,918	—
6	-510,50*	-4,00	30,937	Германій
7	-421,70*	-8,19	30,892	—
8	-93,54*	-4,00	33,409	Германій
9	-679,2 *		32,845	—

*асферичні поверхні, конічні та асферичні коефіцієнти яких наведено у таблиці 3.4 .

Таблиця 3.4

Конічні та асферичні коефіцієнти

№ Поверхні	Радіус кривизни, мм	Конічний коефіцієнт	Асферичний коефіцієнт 4го порядку	Асферичний коефіцієнт 6го порядку	Асферичний коефіцієнт 8го порядку
5	-44,98	-1,925533	6.5172E-003	-3,4897E-004	1,8633E-003
6	-510,50	-6,194265	0,094069	6,4608E-003	-1,6535E-003
7	-421,70	7,884016	-0,064164	-3,6015E-003	3,1604E-003
8	-93,54	0,920602	-0,014238	1,350E-003	1,817E-003
9	-679,2	-7,017296	0,041079	-6,4481E003	-2,0365E-003

Графіки астигматизму, кривизни поля та дисторсії, точкова діаграма та графік функції концентрації енергії каналу ІЧ-спектру наведені в додатку В. Двовимірний модель об'єктива та пляма розсіювання точки, видимого спектру зображено на рисунках 3.8, та 3.9 відповідно.

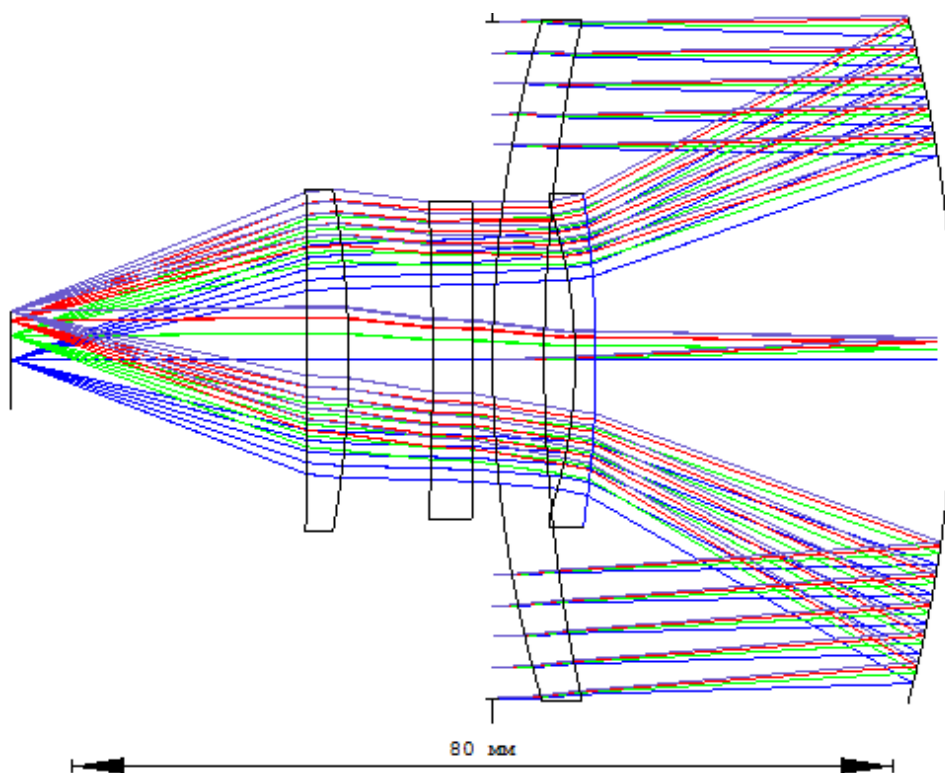


Рисунок 3.7 – Оптична схема каналу ІЧ-спектра випромінювання

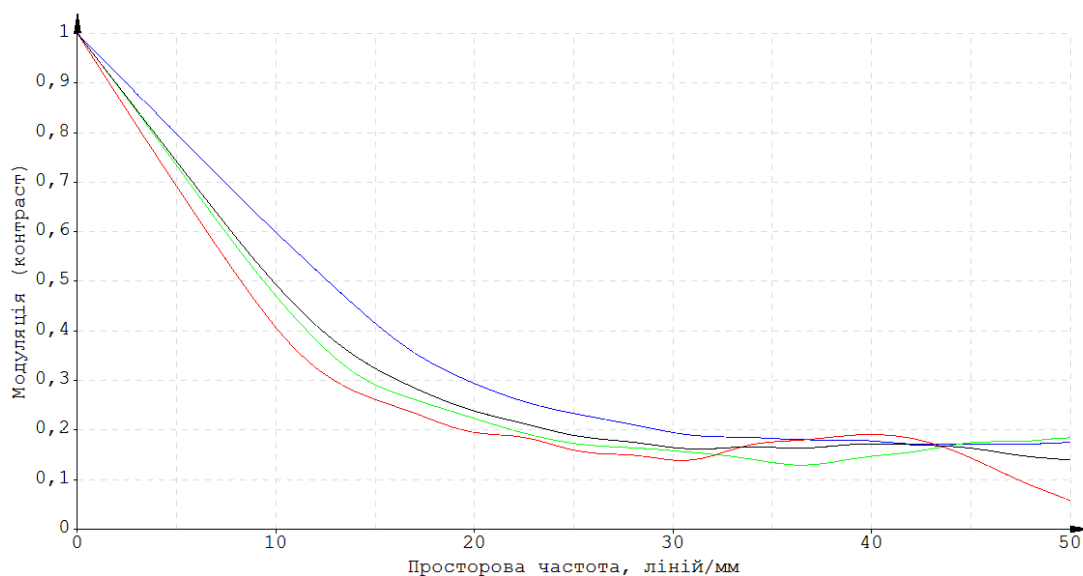


Рисунок 3.8 – МПФ об'єктива ІЧ-діапазона

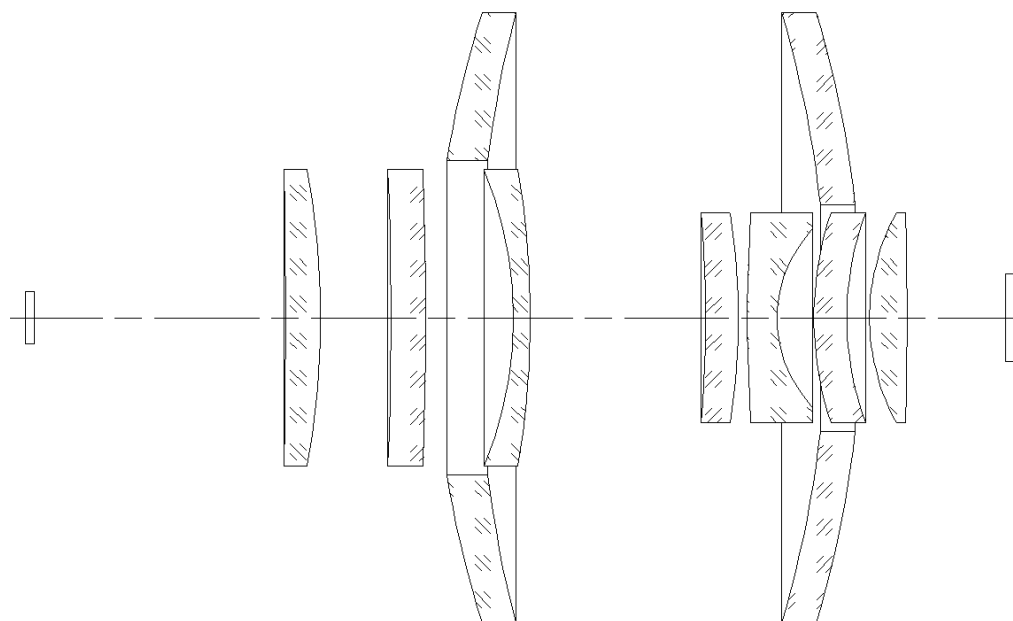


Рисунок 3.9 – Двоканальна оптико-електронна система спостереження з дзеркально лінзовими об'єктивами

Як було відмічено в підрозділі 3.1, енергетичні характеристики ОЕСС, а особливо каналу ІЧ-спектру, залежать від коефіцієнта пропускання випромінювання об'єктивом. Значні втрати на відбиття, викликані великими значеннями показників заломлення використовуваних матеріалів, вимагають розробки і використання високоефективних оптичних покриттів.

Аналіз робіт [5, 6] дозволив визначити досяжні характеристики просвітлюючих, відбивних і світлоподільних покриттів. Результати наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Передбачувані характеристики оптичних покриттів

Тип покриття	Спектральний діапазон, мкм	Інтегральний коефіцієнт	
		пропускання	відбивання
Просвітлююче	0,4 – 0,9	0,99	—
	8 – 13	0,98	—

Продовження таблиці 3.5

Тип покриття	Спектральний діапазон, мкм	Інтегральний коефіцієнт	
		пропускання	відбивання
Відбиваюче	0,4 – 0,9	–	0,90
	8 – 13	–	0,98
Спектроподільне	0,4 – 0,9	–	0,90
	8 – 13	0,98	–
Захистне	0,4 – 0,9	0,99	–
	8 – 13	0,99	–

Використовуючи дані таблиці 3.4 була проведена оцінка пропускання розробленої оптичної системи у всіх каналах. Пропускання для каналу 0,4 - 0,9 мкм склало більше 68%, для каналу 8 - 12 мкм більше 64%. Таким чином обидва канали системи мають пропускання більше 60%, що є високим показником для багатоспектральної і багатoeлементної системи.

3.4 Енергетичний аналіз

3.4.1 Розрахунок максимальної дальності виявлення

Для знаходження максимальної дальності виявлення каналу ІЧ-спектру скористаємося формулою (2.29):

$$R_d^3 \exp(k_A R_d) = \frac{\overline{L_{S,n}}}{SNR_d} \sqrt{\frac{f_f t_E}{\alpha_D \beta_D}} \frac{A_p \tau_0 V_t A_t}{\pi A_D} \frac{4\Delta T}{NETD}, \quad (3.8)$$

де $k_A = 0.2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери при сприятливих умовах, та $k_A = 1.0 \text{ км}^{-1}$ – при обмежених умовах пропускання атмосфери;

$SNR_d = \{6.5, 3, 2\}$ – відношення сигнал/шум, яке сприймає око оператора, для ймовірності правильного виявлення $P_d = 0.9$ і $P_d = 0.5$ [9];

$f^* = 91,7$ мм – фокусна відстань об'єктива;

α_D та β_D – кутові розміри чутливої площадки пікселя приймача випромінювання по горизонталі та вертикалі. $V_D = W_D = pixel = 12$ мкм:

$$\sqrt{\alpha_D \beta_D} = \sqrt{\frac{V_D}{f^*} \frac{W_D}{f^*}} = \frac{pixel}{f^*}; \quad (3.9)$$

$A_D = W_D V_D = pixel^2$ – площа чутливої площадки ПВ;

$A_t = V_t W_t$ – площа об'єкта спостереження, де

$V_t W_t = 2.3 \times 2.3 \text{ м}^2$ – розмір об'єкта, визначені стандартом НАТО 4347 [2];

$\Delta T_0 = 2 \text{ К}$ – температурний контраст; визначені стандартом НАТО 4347 [2];

$f_f = 60 \text{ Гц}$ – частота кадрів відображувального пристрою;

$t_E = 0.2 \text{ с}$ – час сприйняття оком інформації;

$NETD = 0.05 \text{ К}$ – еквівалентна шуму різниця температур;

$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} - \frac{\pi D_t^2}{4}$ – площа вхідної зіниці, де D_p – діаметр вхідної зіниці, D_t – діаметр вторинного дзеркала;

$\tau_0 = 0.64$ – коефіцієнт пропускання об'єктива;

$\overline{L_{S,n}}$ – нормоване значення яскравості зображення об'єкта на екрані монітора (табл.

2.1) Для цього потрібно знати відношення кутового розміру зображення об'єкта ξ''_t до радіуса кружка розсіювання r_s ,

$$\frac{\xi''_t}{r_s} = \frac{f \cdot V_t}{R_{d1} \cdot 0.28 \cdot pixel}; \quad (3.10)$$

$R_{d1} = 4000 \text{ м}$ – перше наближення МДВ.

Отже, підставляючи всі відомі значення у (3.8) отримаємо вираз відносно дальності виявлення R_d , але також необхідно враховувати, що значення $\overline{L_{S,n}}$ вибирається з таблиці 2.2 в залежності від відношення $\frac{\xi''_t}{r_s}$, з першого наближення МВД $L_{S,n} = 0.5$.

$$R_d^3 \exp(0.2R_d) = \frac{0,685}{SNR_D} \sqrt{\frac{60 \cdot 0.2}{1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 2}} \cdot \frac{2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,64 \cdot 5,29}{\pi \cdot 1,44 \cdot 10^{-10}} \cdot \frac{4 \cdot 2}{0,05}$$

$$R_{d0.2,50\%} = 13500 \text{ м}, \quad R_{d0.2,90\%} = 11876 \text{ м}.$$

При обмежених погодних умовах рівняння (3.8) матиме вигляд:

$$R_d^3 \exp(1R_d) = \frac{0,685}{SNR_D} \sqrt{\frac{60 \cdot 0.2}{1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 2}} \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,64 \cdot 5,29}{\pi \cdot 1,44 \cdot 10^{-10}} \cdot \frac{4 \cdot 2}{0,05}$$

$$R_{d1,50\%} = 5431 \text{ м}, \quad R_{d1,90\%} = 4982 \text{ м}.$$

На другому етапі наближення визначаємо нове значення параметра $\bar{L}_{S,n}$, відносно вирухованої МДВ. Для чотирьох випадків $\bar{L}_{S,n,50\%}(0.2) = 0.35$, $\bar{L}_{S,n,90\%}(0.2) = 0.392$, $\bar{L}_{S,n,50\%}(1) = 0.615$, $\bar{L}_{S,n,90\%}(1) = 0.640$. Перерахувавши, отримаємо:

$$R_{d0.2,50\%} = 11960 \text{ м}, \quad R_{d0.2,90\%} = 10680 \text{ м},$$

$$R_{d1,50\%} = 5362 \text{ м}, \quad R_{d1,90\%} = 4940 \text{ м}.$$

3.4.2 Розрахунок максимальної дальності розпізнавання

Для знаходження максимальної дальності розпізнавання скористаємося рівнянням (2.35), яке для ймовірності розпізнавання $P_r = 50\%$ запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} & \frac{\exp\left(-k_A R_r - 2\pi^2 r_s^2 \left(\frac{N_r R_r}{\sqrt{V_t W_t}}\right)^2\right)}{R_r} = \\ & = \frac{0.66 \cdot SNR_E \cdot N_r \cdot NETD}{\Delta T_0 \sqrt{V_t W_t}} \sqrt{\frac{2\alpha_D \beta_D}{f_f t_E}}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

де $k_A = 0.2 \text{ км}^{-1}$ – показник ослаблення для сприятливих умов пропускання атмосфери при сприятливих умовах, та $k_A = 1.0 \text{ км}^{-1}$ – при обмежених умовах пропускання атмосфери;

$f^* = 91,7 \text{ мм}$,

α_D та β_D – кутові розміри чутливої площадки пікселя приймача випромінювання по горизонталі та вертикалі.

$$r_s = 0.28 \sqrt{\alpha_D \beta_D} = 0.28 \sqrt{\frac{V_D}{f^*} \frac{W_D}{f^*}} = 0.28 \frac{\text{pixel}}{f^*}; \quad (3.12)$$

$V_t W_t = 2.3 \times 2.3 \text{ м}^2$ – розмір об'єкта, визначені стандартом НАТО 4347 [2];

$\Delta T_0 = 2 \text{ К}$ – температурний контраст; визначені стандартом НАТО 4347 [2];

$f_f = 60 \text{ Гц}$ – частота кадрів відображувального пристрою;

$t_E = 0.2 \text{ с}$ – час сприйняття оком інформації;

$NETD = 0.05 \text{ К}$ – еквівалентна шуму різниця температур;

$N_d = 4$ – число пар штрихів згідно критеріям Джонсона, який забезпечує ймовірність розпізнавання 50%.

$SNR_r = 4,5$ – відношення сигнал шум, визначається з таблиці 2.2, при ймовірності виявлення $P_r = 0.9$.

Підставивши вираз (3.12) у рівнянні (3.11) та виконавши спрощення отримуємо:

$$\frac{\exp \left(-0.0002 \cdot R_r - \frac{1.58 \frac{\text{pixel}^2}{f^{*2}} N_r^2}{V_t W_t} R_r^2 \right)}{R_r} = \frac{0.93 \cdot SNR_E \cdot N_r \cdot NETD \text{ pixel}}{\Delta T_0 \sqrt{V_t W_t} \sqrt{f_f t_E} f^*} \quad (3.13)$$

Рішенням цього рівняння є МДР при сприятливих умовах:

$$R_{r,0.2} = 3589 \text{ м},$$

і обмежених погодних умовах :

$$R_{r,1} = 3224 \text{ м}.$$

3.5 Розробка рекомендацій щодо схемо-технічних рішень двоканальних оптико-електронних систем спостереження

Розроблювачі ОЕСС, виходячи з технічних вимог і орієнтовного габаритного розрахунку, для подальших розрахунків вибирає один або декілька близьких до передбачуваного типів об'єтивів. При виборі об'єтивів варто виходити з того, що [7]:

- якщо до ОЕСС пред'явлені високі вимоги до роздільної здатності на місцевості за основу до подальших розрахунків варто брати лінзовий об'єтив;

- якщо крім високих вимог до роздільної здатності, висуваються вимоги до забезпечення невеликих габаритів і маси, то за основу для подальших розрахунків варто брати дзеркально-лінзовий об'єтив;

- якщо до ОЕСС пред'являються середні вимоги до роздільної здатності і високі вимоги до маси й габаритів, то за основу до подальших розрахунків варто брати дзеркальний об'єтив з використанням асферичних дзеркал;

- якщо необхідна довжина ОЕСС порівнянна з фокусною відстанню об'єктива, то за основу до подальших розрахунків варто брати лінзовий об'єтив;

- якщо компоненти ОЕСС мають високі вимоги до температури використання, або мають бути захищені від впливу зовнішнього середовища, то за основу подальших розрахунків потрібно брати систему з закритим тубусом;

- якщо ОЕСС крім герметичності має вимоги до маса-габаритних характеристик, то за основу подальших розрахунків потрібно брати дзеркально-лінзовий об'єтив з компенсатором в площині паралельних пучків випромінювання.

Висновки до розділу 3

В даному розділі було розглянуто методи зменшення оптичного вхідного блоку двоканальної оптико-електронної системи спостереження. Розроблено схему компоновки ДКОЕСС та виконано синтез на її основі. Розроблено рекомендації щодо схемо-технічних рішень для ОЕСС. Пропонується виконання розміщення каналів оптико-електронної системи в одному тубусі з впровадженням в неї дзеркально-лінзового об'єктиву, для зменшення масогабаритних характеристик, який може бути встановлений в прицільні системи мобільних пускових ракетних комплексів.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ДВОКАНАЛЬНА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА З ДЗЕРКАЛЬНО-ЛІНЗОВИМИ КАНАЛАМИ»

4.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах існуючі ДКОЕСС, їх типові конструкції, та характеристики було розроблено нову ДКОЕС, з мінімізованим вхідним оптичним блоком, розраховано його параметри, та приведені експериментальні дані. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту розробленої ДКОЕС.

Ідея проекту полягає у розробці нової двоканальної оптико-електронної системи спостереження з одним вхідним вікном в одному тубусі для мінімізації масогабаритних характеристик вхідного блоку, без втрати якості зображення, що уточнено наведено в таблицях 4.1 та 4.2.

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створити двоканальну оптико-електронну систему спостереження з мінімізованими масогабаритними характеристиками	1. Військова справа	Зменшення маси мобільних пускових ракетних комплексів, що переносяться людьми. Зменшення вхідного вікна, що відповідно призводить до зменшення шансу попадання в снаряду в оптичну систему.
	2. Контроль (промисловий, екологічний)	Зменшення масогабаритних характеристик систем спостереження та контролю.
	3. Охорона та безпека	
	4. Наукові дослідження	

Отже, пропонується новий спосіб розміщення каналів оптико-електронної системи з впровадженням в неї дзеркально-лінзового об'єктиву, для зменшення

масогабаритних характеристик, який може бути встановлений в прицільні системи мобільних пускових ракетних комплексів, військову техніку, камери спостереження за територією, пристрої контролю та наукові установки.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають *a* – гірші значення (W, слабкі); *b* – аналогічні (N, нейтральні) значення; *c* – кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Elbit Systems	Bartec	Орлан			
1.	Ціна	600\$	2500\$	1000\$	1600\$			+
2.	Надійність	Довговічний, ремонтпридатний.	Довговічний, ремонтпридатний.	Недовговічний, неремонтпридатний.	Ремонтпридатний.		+	
3.	Ергономічність	Зручна конструкція, простий дизайн	Масивна конструкція, простий дизайн	Зручна конструкція, простий дизайн	Масивна конструкція, поганий дизайн		+	
5.	Економічність (інвестиції)	+	-	-	+			+
6.	Підтримка	3 роки	Кожен рік	Відсутня	Кожні 2 роки			+

Сильними сторонами ідеї проекту є невисока вартість системи відносно конкурентів. Також, сильною стороною є щорічна підтримка оптичної системи та її

електронних компонентів. Нейтральними сторонами є кількість надійності та ергономічність, які маловідрізняються, або зовсім не відрізняються від систем конкурентів.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Зведення до мінімуму масогабаритних характеристик оптико-електронної системи спостереження	Автоматизований розрахунок та глобальна оптимізація	Наявні	Доступні
		Автоматизований розрахунок за допомогою мережі квантових комп'ютерів	Не наявні	Не доступні
		Оптимізація готових оптичних рішень	Наявні	Доступні, але застарілі
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Автоматизований розрахунок та глобальна оптимізація				

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що наш проект буде реалізовуватися технологією автоматизованого розрахунку та глобальної оптимізації. Цей метод використовується багатьма, але конкуренти використовують доступні дорогі програми для синтезу оптичних систем, на відміну від безкоштовних, які були видані кафедрою для студентів. Технології обраного методу є наявними та легкодоступними, а саме головне – вони безкоштовні.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	30 млн.дол.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає(4%/рік)
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	10%

Зробивши попередній аналіз ринку, можна зробити висновок, що потенційний ринок є привабливим для входження, оскільки динаміка ринку є позитивною, немає специфічних вимог до стандартизації та специфікації та немає обмежень для виходу на ринок.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Проектування оптичних систем спостереження, які можуть працювати як вдень так і вночі	Військові, охоронні фірми, органи контролю, вчені.	Ціна, результативність	Приваблива ціна, високий рівень надійності, компактність, мобільність.

Цільовою аудиторією є військові, охоронні фірми, контролюючі органи та вчені, які потребують новітніх та недорогих оптичних приладів, в яких інформація, що отримується в кожному діапазоні, взаємно доповнює інформацію, що надходить в іншому діапазоні, що дозволяє, в кінцевому підсумку, підвищити об'єктивність вихідної інформації. Різна поведінка споживачів спричинена ціною та результативністю приладів. Різницею у поведінці компаній є ціна та високий рівень інформативності результуючих зображень.

Таблиця 4.6

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Усі компанії - міжнародні	Реалізація проекту на міжнародній арені може бути складною	Створення простішого і кращого методу
2.	Поведінка компаній конкурентів	Конкуренти можуть знизити ціну на власні товари з метою залучення нових клієнтів	Зменшення ціни або вдосконалення власної продукції, що приваблює користувачів
3.	Ноу-хау конкурентів	Конкуренти можуть створити новий підхід або метод	Вдосконалення або створення нового власного продукту
4.	Технологічний	Неможливість проведення процедури оцінки відповідності в інших країнах	Підвищення кваліфікації працівників
5.	Бажання клієнтів в отриманні ще більш інформативного зображення	Бажання клієнтів в отриманні ще більш інформативного зображення	Створення нової системи, або вдосконалення вже існуючої

Аналіз факторів загроз показав, що поведінка конкурентів може завадити виходу на ринок. Конкуренти можуть створити новий прилад, створити нові більш технологічні приймачі випромінювання, або вдосконалити свої існуючі прилади. Також, вони можуть знизити ціну на свій прилад. Тому основними реакціями компанії є оптимізація запропонованого приладу та пошук нових результативніших рішень.

Таблиця 4.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Потреба клієнтів в інформативнішому продукті	Клієнти хочуть отримати більш інформативні зображення	Вдосконалення запропонованого продукту
2	Винайдення простішого та результативнішого продукту	При оптимізації та аналізу системи можливе винайдення нового оптико-електронного позиціонування	Оптимізація запропонованого продукту та аналіз існуючих
3	Можливість здешевлення системи	Нові технології можуть сприяти зменшенню ціни	Впровадження нових технологій
4	Вихід на міжнародний ринок	Можливість виходу на міжнародний ринок	Впровадження нових технологій, вдосконалення запропонованого методу

Аналіз факторів можливостей показав, що поведінка споживачів може призвести до вдосконалення виробництва, появи нових технологій, виходу на міжнародний ринок, можливості здешевлення приладу. Тому, є необхідність в подальшому шукати методи вдосконалення приладу, аналіз існуючих та впровадження нових технологій.

Таблиця 4.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Монополістична конкуренція	Галузь в основному є конкурентоспроможною, проте існує декілька явних лідерів	Щоб вийти на ринок необхідно мати конкурентний метод посадки
2. Глобальний рівень конкурентної боротьби	Закордонні та Українські конкуренти	Вихід на Український ринок не передбачає ніяких проблем, оскільки в Україні не має подібних систем, проте вихід на міжнародну арену може бути складним
4. Товарно-видова конкуренція	Конкуренція між товарами одного виду	Оптимізація запропонованого методу та пошук нових
5. Ціновий характер	Продукція дуже дорога	Зменшити вартість розробки, впровадити нові технології

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що наявна конкуренція в міжнародному масштабі ускладнює вихід на ринок, тому необхідно створити якісну систему. Але, моя система є недорогою, тому може конкурувати з існуючими компаніями.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 4.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Elbit Systems Bartec Орлан	КМЗ ЛЗОС ГИПО НПО	Значення розміру поставок для постачальників, налагоджені поставки	Менша вартість, кращі характеристики	Немає товарів заміників
Висновки :	В межах України конкуренти а боротьба не інтенсивна	Можливість виходу на ринок є. Потенційні конкуренти мають гірші характеристики системи	Не диктують оскільки вони не присутні на ринку	Клієнти диктують певні умови: ціна, якість, надійність	Немає товарів заміників

Зробивши аналіз конкурентного ринку, та деякі обмеження з боку клієнтів, можна зробити висновок, що робота на Українському ринку не буде дуже важкою оскільки немає наявної конкуренції. На мій погляд, вихід на міжнародний ринок можливий, не дивлячись на деяку конкуренцію, хоч і система не є новою її характеристики кращі ніж у конкурентів.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Потреби споживачів	Потреби споживачів обумовлюють необхідність розробки проекту
2	Ціна	Ціна на прилади буде відносно нижча за продукти конкурентних підприємств
3	Ергономічність	Суттєво зменшена вага і розмір у порівнянні з конкурентами
4	Маркетинговий потенціал	Можливе створення імені на внутрішньому ринку з подальшими рекомендаціями на світовому ринку
5.	Простота експлуатації	Встановлення системи в комплекс не потребує технічних знань
6.	Технічне обслуговування	Технічна допомога та обслуговування клієнтів

Результат обґрунтування факторів конкурентоспроможності показав, що існує фактор потреби споживачів, який обумовлює необхідність розробки проекту. Цей проект повинен конкурувати за факторами ціни та собівартості, тобто ціна та собівартість повинні бути меншими в порівнянні з рівнем ціни та собівартістю у конкурентів, простим в експлуатації, тобто не потребувати високого рівня знань у споживачів, а також, повинен бути простим в технічному обслуговуванні.

Таблиця 4.11

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

«Двоканальна оптико-електронна система спостереження»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «ДКОЕСС»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Потреби споживачів	12						+	
2	Простота експлуатації	18					+		
3	Висока якість	16					+		
4	Технічна підтримка	11		+					
5.	Ціна	18							+

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «ДКОЕСС» показав, що в цілому технічна підтримка запропонованого проекту є дещо слабкою стороною у порівнянні з конкурентами, тому необхідно покращувати позиції в цьому напрямку.

До сильних факторів конкурентоспроможності можна віднести ціну, якість та простоту експлуатації.

Таблиця 4.12

SWOT- аналіз стартап-проекту

<u>Сильні сторони:</u> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ціна 2. Надійність 3. Простота встановлення 4. Ергономічність 5. Низька конкуренція в Україні 	<u>Слабкі сторони:</u> <ol style="list-style-type: none"> 1. Технічне обслуговування 2. Відомість торгівельної марки
<u>Можливості:</u> <ol style="list-style-type: none"> 1. Створення більш досконалого приладу 2. Поява компаній, що цікавляться інноваційними проектами 3. Монополія на технічну підтримку в Україні 4. Здешевлення системи 	<u>Загрози:</u> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ноу-хау конкурентів 2. Складна реалізація на міжнародній арені 3. Конкуренти можуть знизити ціни з метою залучення нових клієнтів 4. Нові гравці на ринку 5. Потреба в більш інформативному зображенні

SWOT-аналіз стартап проекту дає зрозуміти, що сильними сторонами проекту є низька ціна продукції, простота використання, технічне обслуговування, низька конкуренція в Україні, та нема наявних лідерів в світі. До слабких сторін належать початковий слабкий імідж продукції на ринку, та складність технічного обслуговування поза межами України. Ноу-хау та цінова політика конкурентів, поява нових гравців на ринку, та нові потреби споживачів – це ринкові загрози, а створення більш досконалої системи, або модернізація вже існуючої, здешевлення системи, монополія на технічну підтримку в Україні та поява нових компаній які цікавляться даною системою – це ринкові можливості.

Таблиця 4.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	40%	6-12 міс.
2	Приймати участь в міжнародних виставках	80%	1-2 р.

На основі SWOT-аналізу було розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. З усіх альтернатив було обрано участь в міжнародних виставках – 80%. Але не виключається інша альтернатива, оскільки вона може підвищити конкурентноспроможність серед міжнародних користувачів.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Військові підприємства	Готові	900 копій	Середня	Важка
2	Охоронні компанії		700 копій	Низька	Проста
3	Органи контролю		200 копій	Низька	Середня
Які цільові групи обрано: військові підприємства					

Цільовою групою потенційних клієнтів було обрано військові підприємства, оскільки їм завжди потрібен високий рівень інформативності зображення, а системи, яві використовуються ними достатньо дорогими і габаритними. Всі групи готові сприйняти продукт. Орієнтовний попит для першої групи – 900 копій, другої – 700 копій, третьої – 200. Інтенсивність конкуренції в сегменті в рамках України середня, а вхід у сегмент є важким, проте реальним. Оскільки компанія працює з декількома сегментами – вона використовуватиме стратегію диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформуванати базову стратегію розвитку.

Таблиця 4.15

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Участь у міжнародних виставках	Ексклюзивний розподіл	Дана система, з мінімізованим вхідним блоком буде сприяти зацікавленості клієнтів	Стратегія диференціації

Для обраної альтернативи розвитку проекту було обрано ексклюзивний розподіл як стратегію охоплення ринку, а базовою стратегією – стратегію диференціації. Така стратегія є найбільш доцільною, оскільки вона знижує ступінь замінності товару по відношенню до прямих конкурентів, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні, оскільки у конкурентів реалізовані подібні системи	Компанія буде забирати існуючих у конкурентів і шукати нових	Так, деякі з них, такі як, матричні приймачі випромінювання	Стратегія позиціонування

Базовою стратегією конкурентної поведінки було обрано стратегію позиціонування, оскільки вона є найбільш доцільною. Компанія показує чим продукт унікальний, чим відрізняється від конкурентів, чим корисний споживачу, а саме відбувається позиціонування на особливостях технології, що є важливим для

споживачів. Також, з таблиці видно, що товар не є "першопрохідцем", але компанія та буде копіювати деякі основні характеристики товарів у конкурентів.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію наслідування лідера яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект

Таблиця 4.17

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартапу	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Ціна	Стратегія диференціації	Використання сучасних методів та підходів до вирішення поставлених задач	Ергономічність, ціна, надійність
2	Ергономічність			
3	Надійність			

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Економічність	Доступність для придбання	Придбати дану систему можуть всі потенційні клієнти з Таблиці 4.14
2	Ергономічність	Зменшенна вага і розмір приладу	Суттєво зменшена вага і розмір у порівнянні з конкурентами

Формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач, показало, що споживачі, у яких буде впроваджено даний стартап-проект, будуть задовольнятися потреби, спостереження за об'єктом в цілодобовому всепогодному режимі, зі зменшеними габаритними характеристиками, та ціновою політикою ніж у конкурентів.

Таблиця 4.19

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові	
I. Товар за задумом	Двоканальна оптико-електронна система спостереження з дзеркально-лінзовими об'єктивами	
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	
	1.Ціна	600\$
	2.Діаметр вхідної зіниці	66 мм
	3.Довжина оптичної системи	100 мм
	5. Маса	800 г
	6. Межі фокусування	2-∞ м
	7. Фокусна відстань	90\130 мм
	8. Кутове поле зору	6°
	Якість: параметри тестування, стандарти, нормативи	
	Пакування: коробка з пінопластом обернена плівкою, що не пропускає вологу, антистатичний пакет, гарантійний талон від виробника	
Марка: LLens		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: вміння проектувати оптико-електронні системи	
	Після продажу підтримка клієнту 3 роки	
Товар буде захищений за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці		

Опис трьох рівнів моделі товару показав, що основний задум даного стартап-проекту полягає у створенні нового оптичного вхідного блоку системи спостереження. Перевагою даного проекту є зменшення габаритних розмірів системи, без втрати якості зображення в порівнянні з низьким рівнем ціни на проект. До продажу виробникам потрібно мати особливі навички для створення приладу, а після продажу клієнти зможуть користуватися без спеціальних навичок, що робить прилад простим у використанні. Проект буде захищено від копіювання за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 4.20).

Таблиця 4.20

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Товари-замінники відсутні	1000-2500\$	1 080 000\$	600\$/999\$

Виконавши аналіз рівня цін на товари замінники, товари аналоги та доходів цільової групи споживачів було сформовано нижню \$600 та верхню \$999 межі встановлення ціни на товар, що дає цінову перевагу перед товарами конкурентів.

Таблиця 4.21

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Замовлення напряму у виробника	- встановлення контактів зі споживачами, їх підтримка; - розробка і реалізація програм з підтримки лояльності клієнтів; - дослідницька робота зі збору маркетингової інформації.	Канал нульового рівня (виробник безпосередньо продає товар клієнту)	Збут продукції відбуватиметься безпосередньо через сайт виробника

Збут товару буде відбуватися через сайт розробника. Завдяки цьому можна легко встановлювати контакти зі споживачами та їх подальшу підтримку, організовувати дослідницьку роботу зі збору маркетингової інформації та розробку і реалізацію програм підтримки лояльності клієнтів.

Таблиця 4.22

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Зацікавленні клієнти, що завжди у пошуках нових технологій, відвідують виставки, дізнаються в інтернеті, тощо	Міжнародні виставки, мережа інтернет (спеціалізовані сайти або форуми)	Участь в усіх можливих тематичних виставках, направлений інтернет-маркетинг	Представлення товару, його позиціонування з метою залучення та зацікавлення клієнтів	«Цілодобова всепогодня оптико-електронна система спостереження з мінімізованим оптичним блоком»

Концепція маркетингових комунікацій показала, для того щоб популяризувати власну продукцію необхідно, показувати продукцію на виставках, публікувати дослідницькі статті, тобто показувати свою активну розробницьку наукову діяльність по різних джерелах. Завданням рекламного повідомлення має стати представлення товару відповідній аудиторії (підприємств).

Висновки до розділу 4

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проекту можна зробити висновок.

Попит на продукцію є, що підтверджується позитивною динамікою ринку та потребі в цілодобовому всепогодному спостереженні.

Інтенсивність конкуренції в сегменті в рамках України не значна, а вхід у сегмент є простим, але ускладнюється якщо виходити на міжнародний ринок.

Цільовою групою потенційних клієнтів є військові компанії, охоронні компанії, органи контролю та вчені.

В якості альтернативи впровадження проекту доцільно обрати представлення товару на міжнародних виставках.

Перевагою даного проекту є зменшення габаритних характеристик системи та її надійність в порівнянні з низьким рівнем ціни на проект. До продажу виробникам потрібно мати особливі навички для створення приладу, а після продажу клієнти зможуть користуватися без спеціальних навичок, що робить прилад простим у використанні. Проект буде захищено від копіювання за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці.

Оскільки цільова аудиторія дізнається про нову продукцію переважно через мережу інтернет, та виставкові зали, було вирішено, що найдоцільнішим шляхом розповсюдження продукції є сайт виробника та представлення системи на міжнародних виставках. Також, необхідним є створювати наукові публікації та виступи на наукових конференціях.

Здійснення (імплементация) запропонованого проекту є доцільною, оскільки цілодобові всепогодні системи спостереження залишаються та будуть актуальними у майбутньому.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Двоканальні оптико-електронні системи використовують як ефективний пристрій всепогоднього всецілодобового спостереження.

2. Найпоширенішими спектральними діапазонами у зазначених вище оптико-електронних систем є канали видимого та дальнього інфрачервоного спектру.

3. В ході дослідження математичної моделі було виявлено, що тип побудови та сполучення оптичних систем обох каналів має найбільший вплив на маса-габаритні розміри системи.

4. Виконано габаритний розрахунок двоканальної оптико-електронної системи спостереження на основі обраних матричних приймачів випромінювання. За допомогою програми для проектування оптичних систем «PODIL» було виконано параметричний синтез оптичних систем обох каналів. Для каналу інфрачервоного спектру виконано розрахунок дальності виявлення та дальності розпізнавання. В результаті порівняння двоканальної системи з її аналогами, з виключно рознесеними об'єктами, було виявлено, що розрахована двоканальна оптична система спостереження має кращі маса-габаритні характеристики.

Підтверджено, що сполучення двох каналів оптичного вхідного блоку в одному тубусі з єдиним вхідним вікном є найкращим методом конструювання малогабаритних двоспектральних систем спостереження.

6. Під час планування стартап-проекту було виявлено що:

- попит на продукцію є, що підтверджується позитивною динамікою ринку та потребі у проектуванні малогабаритних систем спостереження.
- конкуренція на ринку України в цій області не є значною, що обумовлює легкий вхід на український ринок;
- цільовою аудиторією є військові та охоронні компанії.

- в якості альтернативи впровадження проекту доцільно обрати презентацію проекту на міжнародних виставках.

Розробка габаритно мінімізованих багатоканальних оптико-електронних систем спостереження є доцільною задачею, оскільки подібні системи є надзвичайно популярними та продовжують удосконалюватися.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / [V. H. Kolobrodov, M. I. Lykholit, V. I. Mykytenko та ін.]. // Visnyk NTUU KPI. – 2017. – №69. – С. 30–34.
2. STANAG 4347: NATO standardization agreement: definition of nominal static range performance for thermal imaging systems. URL: <http://www.everyspec.com>. (дата звернення 02.12.2019).
3. Tianzhu X. A fusion algorithm for infrared and visible images based on adaptive dual-channel unit-linking PCNN in NSCT domain / X. Tianzhu, Li Yan, G. Rongrong Gao. // Infrared Physics & Technology. – 2015. – №69. – С. 53–61.
4. Вафиади А. В. Вычисление сигнала и шума на выходе тепловизионного прибора // В кн.: Тепловидение. Межвуз. сб. научн. трудов / Под ред. Н. Д. Куртева. – М.: Изд-во МИРЭА, 1994. – № 10. – С. 10–18.
5. Губанова Л. А. Оптические покрытия. Учебное пособие. / Л. А. Губанова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2012. – 101 с.
6. До Тан Тай. Пятислойные четвертьволновые просветляющие покрытия для инфракрасного диапазона спектра / До Тан Тай, Л. А. Губанова. // Оптический журнал. – 2014. – №10. – С. 72–76.
7. Егоренко М.П., Ефремов В.С. Двухспектральная зеркально-линзовая система // Патент РФ на полезную модель. №20101018755, 2010
8. Заказнов Н. П. Теория оптических систем / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. – Москва: Машиностроение, 1992. – 447 с.
9. Иванов В.П., Балоев В.А., Денисов И.Г., Скочилова И.А. Двухканальная зеркально-линзовая система // Патент РФ на полезную модель. №2672703С1, 2017

10. Колобродов В. Г. Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спосереження / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Є. Г. Балінський. – Київ: «Вік прінт», 2017. – 202 с.
11. Колобродов В. Г. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко. – Київ: Поліграфічний центр «Аверс», 2013. – 178 с
12. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних та телевізійних систем спостереження / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – Київ: НТУУ "КПІ", 2007. – 359 с.
13. Лихоліт М. І., Колобродов В. Г., Овечкін В. С. Визначення дальності розпізнавання об'єктів тепловізором з мікроболометричною матрицею // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2004. – Вип. 27. – С. 43–50.
14. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика / Д. Д. Максудов. – Санкт-Петербург: Наука, 1979. – 391 с.
15. Матвеев А. Н. Оптика / А. Н. Матвеев. – Москва: Высшая школа, 1985. – 351 с.
16. Микитенко В. І. Багатоканальні іконічні системи дистанційного моніторингу / В. І. Микитенко, В. Й. Котовський, Г. В. Богатирьова – Київ: НТУУ "КПІ". – С. 1–9.
17. Микитенко В. І. Дистанційні спостереження в тумані з допомогою пасивних двоканальних іконічних оптико-електронних систем / В. І. Микитенко, В. Й. Котовський. // Вісник НТУУ «КПІ». – 2008. – №35. – С. 29–36.
18. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
19. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.
20. Многоспектральные фоточувствительные приборы / [Л. Василевская, С. Клемин, Ю. Концевой та ін.]. // ФОТОНИКА. – 2007. – №4. – С. 18–23.

- 21.Проектирование оптических систем / Под ред. Р. Шеннона и Дж. Вайанта.— Пер. с англ.— М.: Мир, 1983. — 432 с.
- 22.Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. - СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000 - 167 с
- 23.Соклоьский М.Н., Ефремов В.А., Лапо Л.М., Павлова В.А., Тупиков В.А., Крюков С.Н., созинова М.В. Двухканальная оптико-электронная система // Патент РФ на полезную модель. №2606699С1, 2015
- 24.Тарасов В. В. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. — Москва: Логос, 2006. — 191 с.
- 25.Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992. — 400 с.

ДОДАТОК А

12-micron technology enables
smaller, lower cost systems

Specifications

Detector

Detector type	Uncooled VOx microbolometer
NETD	<50 mK
Spectral response region	7.5 μm – 13.5 μm
Array format	640 x 480
Pixel pitch	12 μm
Frame rate	Switchable: 60 Hz or 30 Hz

Video processing

Output modes	Black hot, white hot, edge detect, color enhanced (customizable)
Contrast enhancement	AGC or manual, histogram equalization, local area contrast enhancement algorithms available
Sharpness adjustment	Manual control
Custom overlays	User-customizable overlays with embedded display drivers
Digital zoom	.5X, 2X, 4X, 8X
Local image storage	60 frames

Interfaces

Video formats and interface	16-bit parallel digital 2.5V, NTSC/PAL, or USB2
Communications interface	UART or USB
Power consumption	1.1 W
Input voltage	External: 2.0 – 3.8 VDC USB: 5.0 VDC

Operational

Operating temperature	-40°C to +65°C
Storage temperature	-46°C to +71°C

Physical

Size	26.2 mm x 33.3 mm x 22.9 mm
Weight	40 g



17-micron

12-micron



Infrared imagery generated by TWV640



For more information contact:

BAE Systems
1841 Zanier Road, Suite 50
San Jose, CA 95112 USA
T: (650) 479-5749
E: cams.sales@baesystems.com

Cleared for open publication on 12/16

BAE Systems | TWV640 thermal camera core

This product is export controlled

The export of this product is governed by the United States Department of Commerce under ECCN 6A003.b.4.b. Use contrary to U.S. law is prohibited.


Disclaimer and copyright

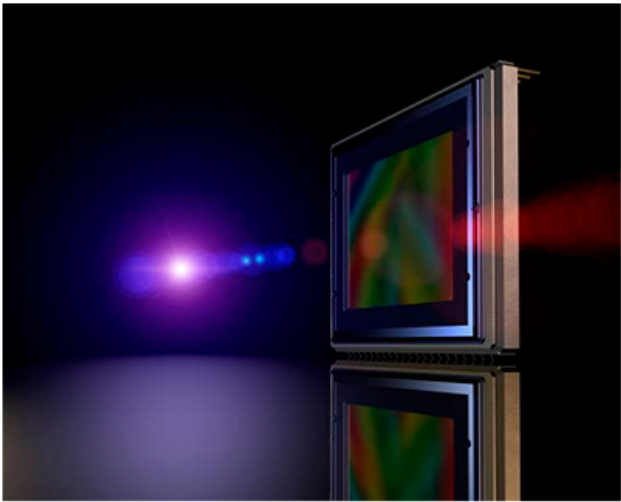
This document gives only a general description of the product(s) and service(s) and, except where expressly provided otherwise, shall not form any part of any contract. From time to time, changes may be made in the products or the conditions of supply.

BAE SYSTEMS is a registered trademark of BAE Systems plc.
©2016 BAE Systems. All rights reserved.
CS-16-G63-001

ДОДАТОК Б

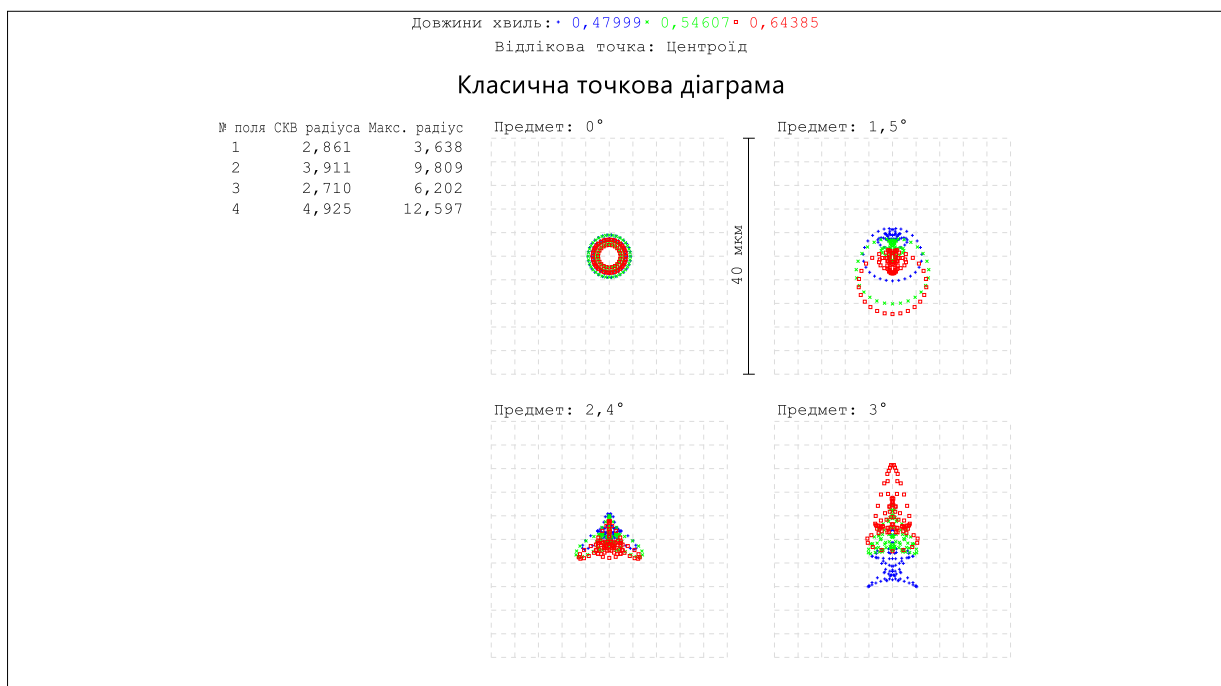
NOIX2SE9400B-LTI1

Product Attribute	Attribute Value
Manufacturer:	ON Semiconductor
Product Category:	Image Sensors
RoHS:	 Details
Type:	CMOS Image Sensor
Image Size:	3072 H x 3072 V
Colour Sensing:	RGB Bayer
Minimum Operating Temperature:	- 40 C
Maximum Operating Temperature:	+ 85 C
Resolution:	9.4 Megapixels
Number of frames per second:	56 fps
Pixel Size - W x H:	3.2 um x 3.2 um
Package/Case:	CLGA-163
Operating Supply Voltage:	2.8 V
Packaging:	Tray
Brand:	ON Semiconductor
Moisture Sensitive:	Yes
Optical Format:	13.9 mm
Product Type:	Image Sensors
Factory Pack Quantity:	4
Subcategory:	Sensors
Supply Voltage - Max:	3 V
Supply Voltage - Min:	1.2 V

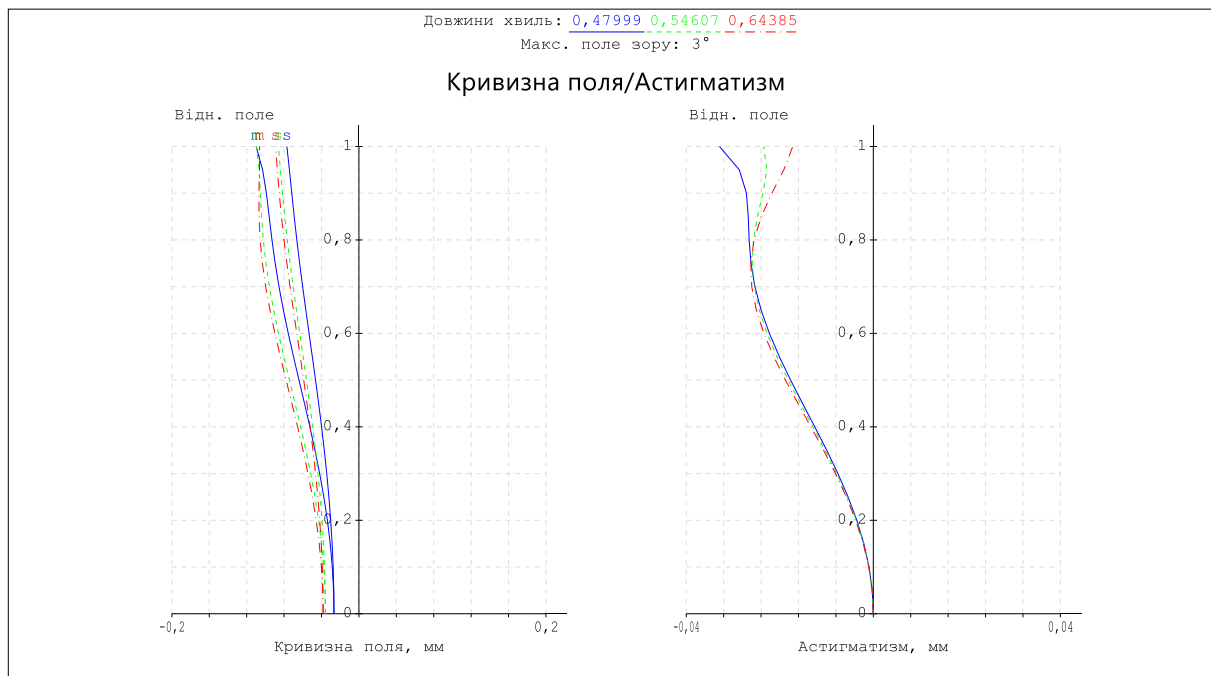


ДОДАТОК В

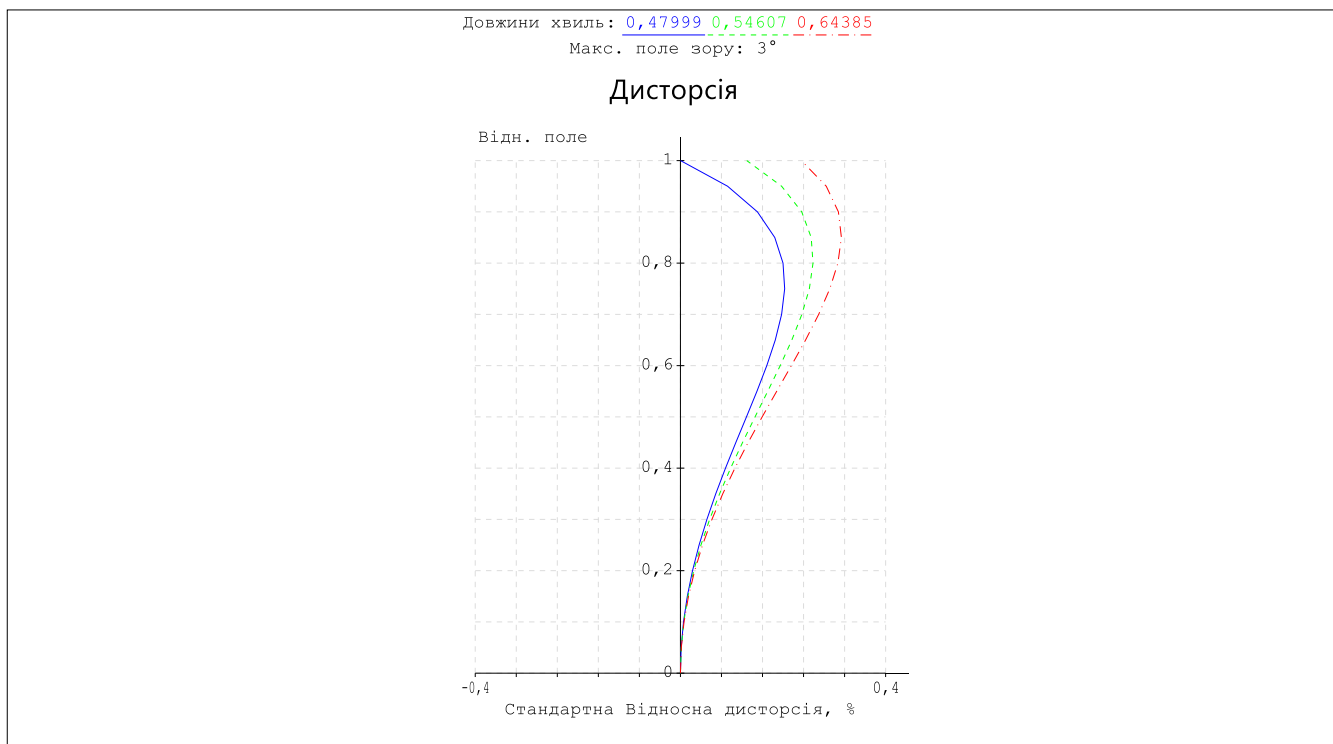
Класична точкова діаграма каналу видимого спектра



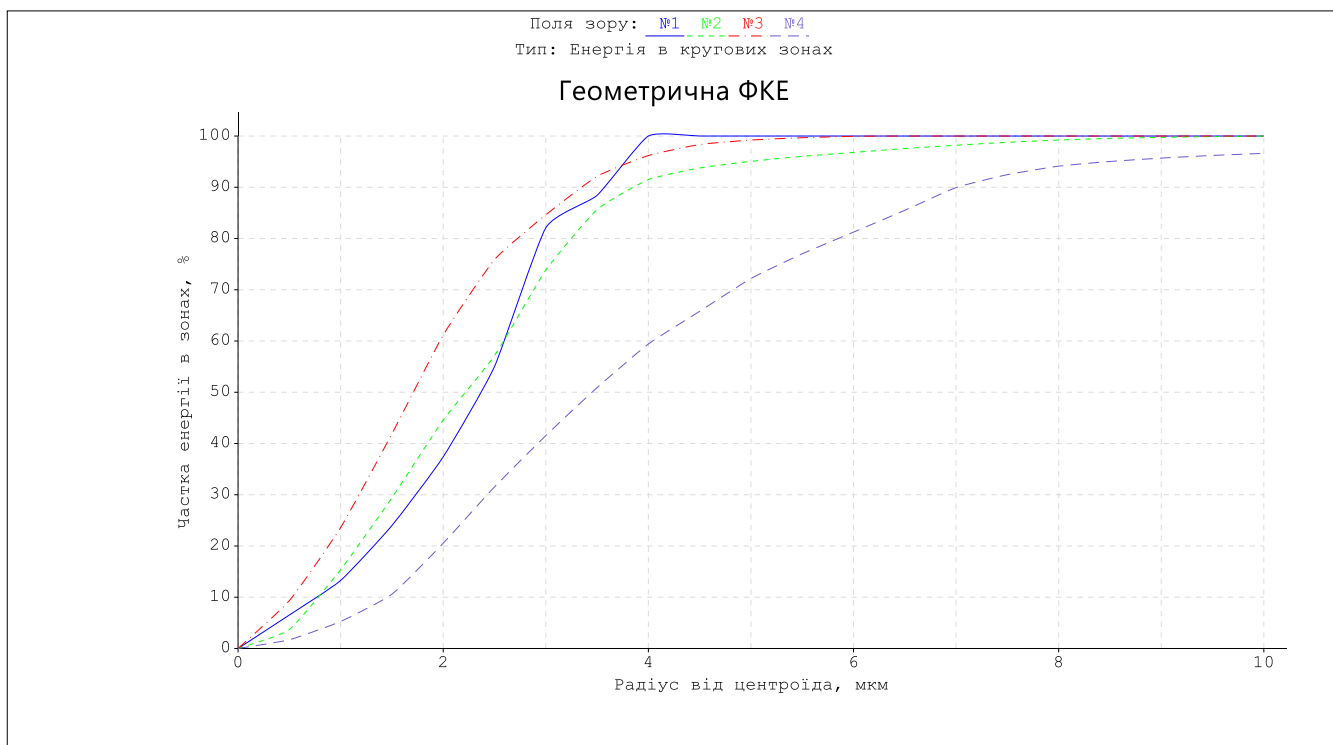
Кривизна поля та астигматизм каналу видимого спектра



Дисторсія каналу видимого спектра

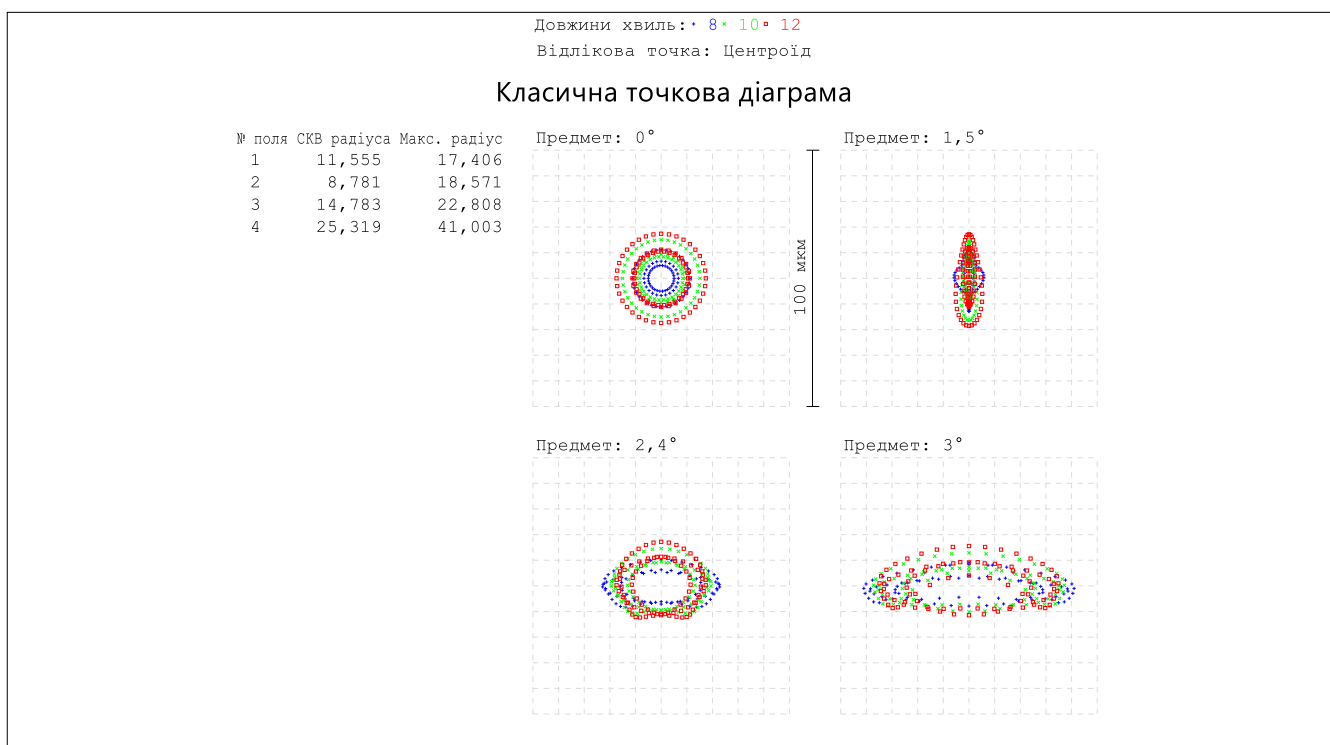


Геометрична функція концентрації енергії каналу видимого спектра

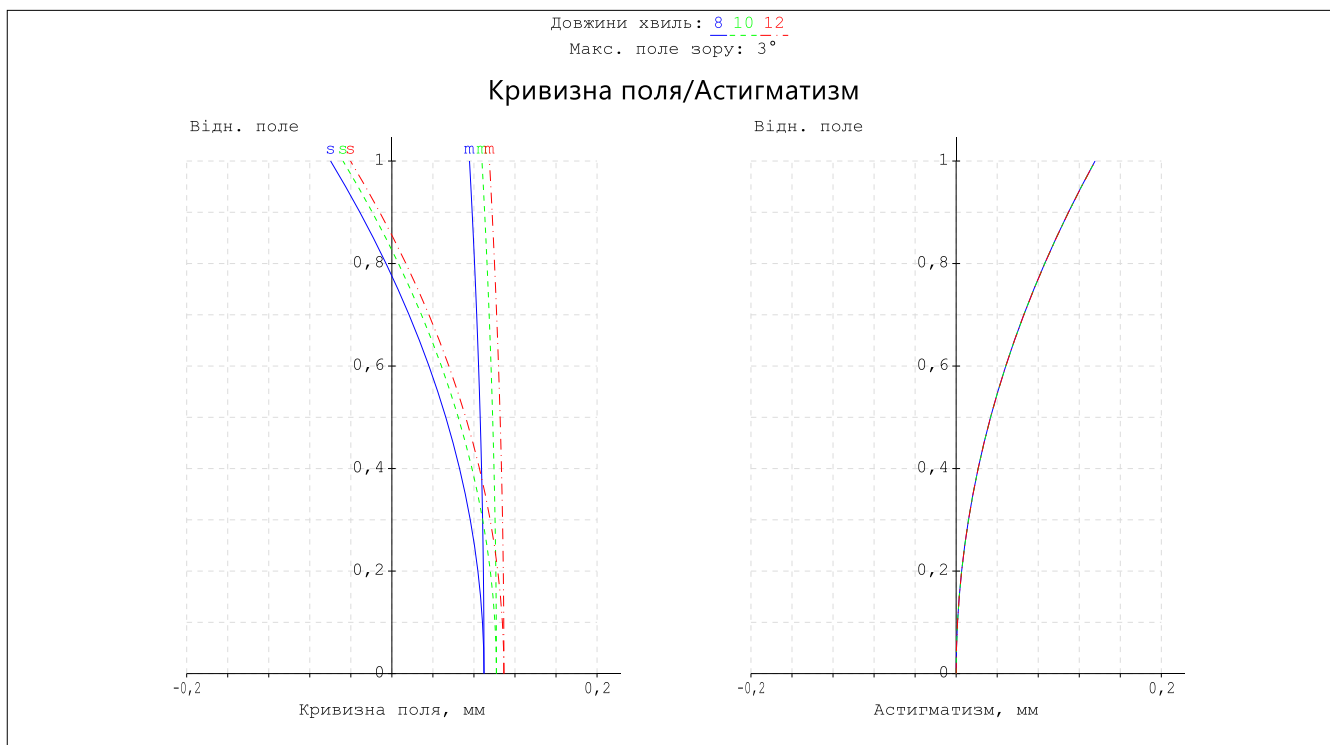


ДОДАТОК Г

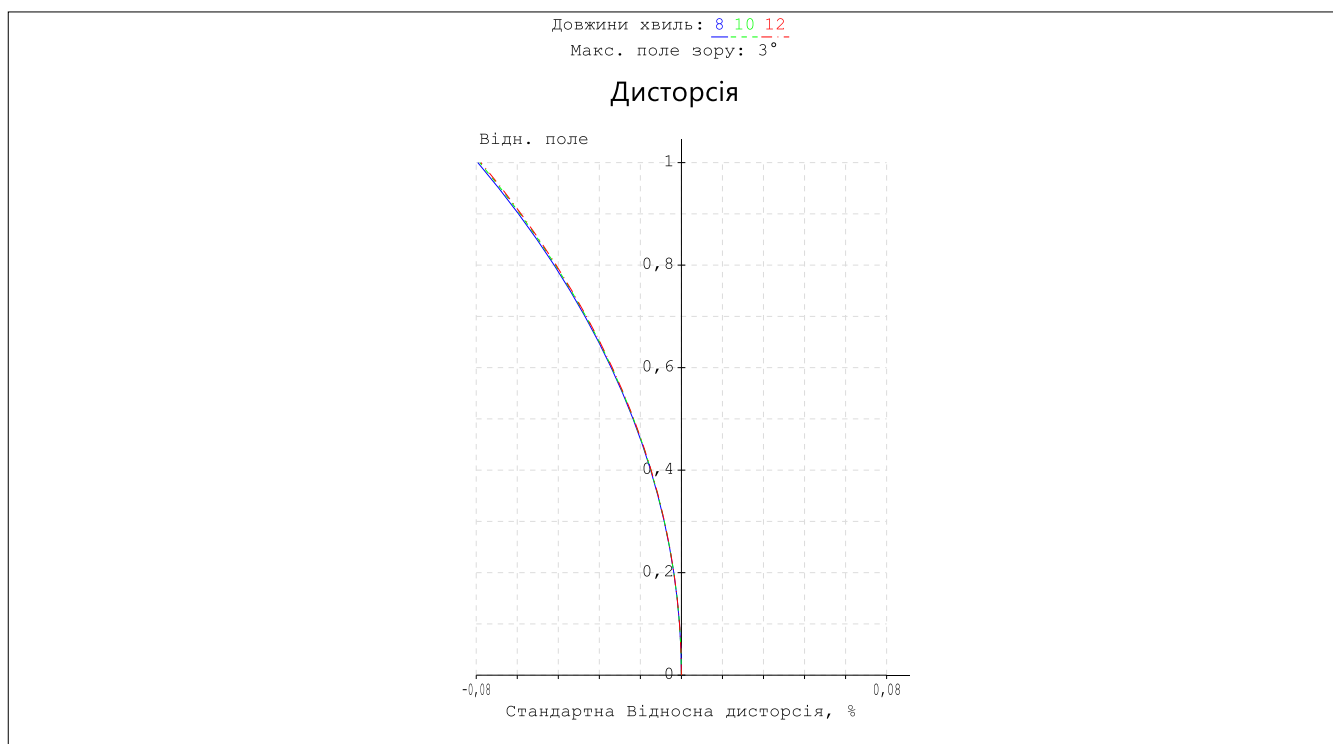
Класична точкова діаграма каналу ІЧ-спектра



Кривизна поля та астигматизм каналу ІЧ-спектра



Дисторсія каналу ІЧ-спектра



Геометрична функція концентрації енергії каналу ІЧ-спектра

